



**Jorge Miguel
da Costa Cubal**

Fortius IV - Posicionamento de Microfones



**Jorge Miguel
da Costa Cubal**

Fortius IV - Posicionamento de Microfones

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica dos Doutores António Guilherme Rocha Campos e José Manuel Neto Vieira, Professores Auxiliares do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

o júri / the jury

presidente / president

Prof. Dr. Armando José Formoso de Pinho

Professor Associado da Universidade de Aveiro (por delegação do Reitor da Universidade de Aveiro)

vogais / examiners committee

Prof. Dr. Diamantino Rui da Silva Freitas

Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. António Guilherme Rocha Campos

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. José Manuel Neto Vieira

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

**agradecimentos /
acknowledgements**

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Prof. Guilherme Campos e Prof. José Vieira, pela motivação e conhecimento transmitidos ao longo de todo o trabalho. A sua disponibilidade foi enorme, estando sempre presentes e dispostos a esclarecer dúvidas assim como a providenciar conselhos preciosos.

Ao Mestre Daniel Albuquerque pelas dicas importantes e o conhecimento partilhado na elaboração do trabalho.

A José Fortes pela disponibilidade em ceder alguns dos seus microfones, por estar presente durante a medição desses mesmos microfones e pela informação partilhada.

A todos os meus colegas e amigos que ao longo dos últimos cinco anos foram companheiros importantes nesta caminhada, em especial os que neste último ano me acompanharam, e sugeriram alguns apontamentos interessantes para a elaboração deste trabalho.

A toda a minha família que sempre me apoiou e incentivou ao longo de todo o percurso académico, em particular ao meu pai e ao meu irmão cuja ajuda, a todos os níveis, foi enorme.

À Patrícia que sempre me dispensou muita atenção, ajuda, compreensão e amor ao longo destes últimos anos.

Palavras-chave

Microfone, Áudio, Resposta impulsional, Posicionamento, Medição, Pistão circular plano, Estéreo, Mono, Frequência, Cadeia de medida

Resumo

Esta dissertação centra-se no estudo sistemático de como as características dos microfones e o seu posicionamento influenciam a captação de som. Começou-se por abordar conceitos teóricos para a simulação de um transdutor e desenvolveu-se um modelo do pistão circular plano. O estudo deste modelo proporciona um conhecimento genérico sobre o comportamento de microfones e de transdutores sonoros em geral.

Desenvolveu-se um sistema para medição de microfones recorrendo ao Matlab e às ferramentas que este nos oferece. Baseia-se no método da correlação, aplicável à medição da resposta impulsional de sistemas LTI. Com as adaptações convenientes, mediram-se microfones e também técnicas de captação estéreo. O sistema desenvolvido permite, de forma sistemática e numa vulgar sala, através da criação de condições quasi-anecóicas, medir a resposta de qualquer microfone.

Usou-se o microfone Behringer ECM8000 como referência, para efeitos de compensação da cadeia, um processo que permite isolar, na resposta obtida, a contribuição do microfone que se pretende medir. Mediram-se diversos microfones e também algumas das configurações estéreo mais usuais - AB, XY e M/S - apresentando as respostas no tempo e em frequência.

Os resultados obtidos explicam alguns fenómenos tipicamente descritos pelos técnicos de som e permitem conhecer e prever o comportamento de um microfone.

A informação obtida neste trabalho é mais um contributo para o projecto Fortius. Este projecto visa definir algoritmicamente os critérios de posicionamento de microfones e assim encontrar, de forma automática, o ponto "ótimo" de captação.

Keywords

Microphone, Audio, Impulse Response, Placement, Measurement, Plane Circular Piston, Stereo, Mono, Frequency, Measurement Chain

Abstract

This dissertation is focused on the systematic study of how the characteristics of microphones and their positioning influence the recorded sound. After a brief review of the theoretical concepts involved in the simulation of acoustic transducers, a model of the plane circular piston is presented. The analysis of this model provides general insight into the performance of microphones and acoustic transducers in general.

A microphone measurement system was developed, with the help of the tools provided by Matlab. It is based on the correlation method, applicable to LTI-system impulse response measurement.

With the appropriate adjustments, microphones, as well as stereo recording techniques, were tested with this system. It provides a systematic way of measuring the impulse response of any microphone in an ordinary room, so long as quasi-anechoic conditions are established. A Behringer ECM8000 was used as reference microphone, for the purpose of compensating the measurement loop and separating the actual response of the microphone being measured. Tests were carried out with a number of microphones of various types and some of the most popular stereo recording configurations - AB, XY and M/S. Both time and frequency domain results are presented. The results help explain artefacts often reported by sound technicians and make it easier to understand and predict the behaviour of a microphone. This work is a contribution to the Fortius project. This project aims at obtaining an algorithmic definition of microphone positioning criteria, to help find, in automatic fashion, the 'optimal' recording spot in a given room.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e motivação	1
1.2	Estrutura da dissertação	4
2	Microfones	5
2.1	Modelação	5
2.1.1	Radiação de um pistão circular plano	5
2.1.2	Simulação no Matlab	8
2.1.3	Posicionamento virtual de microfones	12
2.1.4	Interpolação	15
2.1.5	Demo	18
2.2	Caracterização	20
2.3	Tipos de transdutores	21
2.3.1	Microfone dinâmico	22
2.3.2	Microfone de condensador	23
2.4	Resposta direcciona	25
2.4.1	Omnidirecciona	25
2.4.2	Cardióide	25
2.4.3	Hipercardióide	26
2.4.4	Figura de 8	27
2.5	Microfones de medição	27
3	Resposta impulsional e sua medição	29
3.1	Sistemas lineares e invariantes no tempo (LTI)	29
3.1.1	Noção de sistema	29
3.1.2	Linearidade	29
3.1.3	Invariância temporal	30
3.1.4	Resposta Impulsional de um Sistema LTI	30
3.2	Medição da resposta impulsional de Sistemas LTI	30
3.2.1	Método da correlação	30
3.2.2	Sinais de teste. Uso de <i>chirps</i> logarítmicos	31
3.2.3	Implementação da técnica de Farina	32
3.3	Resposta impulsional de uma cadeia áudio	34
3.4	Extracção da resposta impulsional do microfone	35
3.4.1	Eliminação da influência da sala	35
3.4.2	Compensação da cadeia de medida	36

3.5	Direccionalidade	37
3.6	Aplicação para medição da IR de microfones	38
3.6.1	Sinais de teste e sincronismo	38
3.6.2	Gravação, pós-processamento e visualização	38
3.6.3	<i>Scripts</i> e funções auxiliares	39
3.6.4	Interface com o Utilizador	41
4	Ensaios de medição de microfones	43
4.1	Introdução	43
4.2	Ensaios em câmara anecóica	44
4.3	Ensaios em condições <i>quasi</i> -anecóicas	46
4.3.1	Ensaio 1 - Microfone de condensador (omnidireccional)	46
4.3.2	Ensaio 2 - Microfone dinâmico (supercardióide)	49
4.3.3	Ensaio 3 - Microfone dinâmico (cardióide)	52
5	Captação estéreo	57
5.1	Técnicas com microfones espaçados	58
5.1.1	Estereofonia de tempo: técnica AB	58
5.1.2	Estereofonia de tempo e intensidade. Técnica ORTF	58
5.1.3	Estereofonia binaural	59
5.2	Técnicas com microfones coincidentes	59
5.2.1	Técnica XY	59
5.2.2	Técnica Blumlein	60
5.2.3	Técnica M/S	61
5.3	Técnicas multi-microfone	61
5.4	Ensaio de microfones estéreo	63
5.4.1	Microfone Studio Project C4	63
5.4.2	Microfone Studio Project LSD2	64
5.4.3	Microfone AKG C426B	64
5.5	Avaliação de técnicas estéreo	65
5.5.1	Técnica AB	66
5.5.2	Técnica XY	70
5.5.3	Técnica M/S	71
5.5.4	Apreciação dos resultados	74
6	Conclusões e Trabalho Futuro	75
A	Scripts	77
B	MATLAB	79
C	Data acquisition toolbox	81
D	Microfones	87
E	Manual de Utilização do Sistema de Medição	91
F	Lista de Acrónimos	95

Lista de Tabelas

2.1	Alguns instrumentos e respectivas frequências do som que produzem [16]. . .	12
5.1	Posição e distância entre microfones na técnica AB.	67
A.1	Ficheiros e respectiva descrição.	77
C.1	Funções para criação de objectos.	82
C.2	Adaptadores suportados pela <i>aquisition toolbox</i>	83

Lista de Figuras

1.1	Eixo sonoro.	2
2.1	Modelo circular de um pistão acústico.	5
2.2	Variação da resposta em frequência com a direcção.	9
2.3	Variação da directividade com o ângulo.	10
2.4	Mapeamento da resposta de um microfone em função do ângulo e da frequência.	11
2.5	Convolução com sucessivas respostas.	14
2.6	Exemplo de descontinuidade num sinal sinusoidal entre dois blocos de 1024 amostras, após o processamento.	15
2.7	Interpolação das respostas do microfone antes da convolução.	16
2.8	Variação da função $\alpha(n)$	17
2.9	Interpolação efectuada após a convolução do sinal com a resposta do microfone.	17
2.10	Sinal sinusoidal a 1kHz após interpolação.	18
2.11	Sinal original, flauta tenor captada em condições anecóicas, sem qualquer tipo de processamento.	19
2.12	Flauta tenor captada em condições anecóicas, processada com as respostas do pistão.	19
2.13	Gráfico polar para o microfone AE3300 fornecido pelo fabricante.	20
2.14	Resposta em frequência fornecida pelo fabricante.	20
2.15	Dados fornecidos pela Audio-Technica no <i>datasheet</i> do microfone AE3300.	21
2.16	Esquema de funcionamento de um microfone dinâmico.	22
2.17	Esquema exemplificativo do funcionamento de um microfone de condensador.	23
2.18	Diagrama omnidireccional.	25
2.19	Diagrama cardióide.	26
2.20	Diagrama hipercardióide.	26
2.21	Diagrama figura de 8.	27
3.1	Sistema genérico no domínio do tempo.	29
3.2	Método da correlação para obtenção da resposta impulsional.	30
3.3	Diagrama geral do sistema de medição com aplicação do filtro inverso.	32
3.4	Chirp logarítmico (20Hz-20kHz).	33
3.5	Chirp logarítmico filtrado.	33
3.6	Correlação entre $x[n]$ e $x_f[n]$ calculada com a função <i>xcorr.m</i> do Matlab.	33
3.7	Resposta em frequência do resultado da correlação.	34
3.8	Cadeia áudio.	34
3.9	Esquema da montagem para medição da resposta de microfones.	35
3.10	Diagrama de blocos do sistema.	35

3.11	Estabelecimento de condições <i>quasi</i> -anecóicas.	36
3.12	Movimentação do microfone para medição da resposta em ângulos distintos. .	37
3.13	Resposta medida (a azul) e sinal de sincronismo (a verde)	39
3.14	Rotina <i>manualfft.m</i> , 358 amostras.	41
3.15	Rotina <i>manualfft.m</i> , 358+3000 amostras.	41
3.16	Interface para medição de microfones.	42
4.1	Medição em câmara anecóica, usando a plataforma giratória.	44
4.2	Medição em câmara anecóica aproximando os transdutores.	44
4.3	Resposta no tempo, Behringer na sala anecóica, 6m.	45
4.4	Resposta no tempo, Behringer na sala anecóica, ampliada.	45
4.5	Resposta em frequência (toda a cadeia de medida).	45
4.6	Resposta em frequência relativa (cadeia de medida compensada).	45
4.7	Medição da resposta axial (Behringer ECM8000).	46
4.8	Equipamentos: placa de som e amplificador.	46
4.9	Resposta a 0° (Behringer), com algumas reflexões.	47
4.10	Resposta a 0° (Behringer), apenas na zona de interesse.	47
4.11	Resposta em frequência para vários ângulos, Behringer ECM8000.	48
4.12	Comparação das respostas em frequência para 20cm e 2m.	48
4.13	Resposta em frequência (Behringer) relativa à IR a 0°	49
4.14	Resposta a 0° (Senheiser 541), com 1m entre os transdutores.	50
4.15	Resposta em frequência (Senheiser 541) para três orientações.	51
4.16	Resposta em frequência relativa (Senheiser 541)	52
4.17	Resposta (Shure Prologue 10L) a 1m e 0°.	53
4.18	Resposta em frequência (Shure Prologue 10L)	54
4.19	Resposta em frequência relativa (Shure Prologue 10L).	55
4.20	Resposta em frequência dada pelo fabricante (Shure Prologue 10L).	55
4.21	Resposta em frequência (Shure prologue 10L), com amplificação ajustada. . .	56
5.1	Técnica AB.	58
5.2	Técnica ORTF.	59
5.3	Técnica XY.	60
5.4	Técnica Blumlein.	60
5.5	Técnica M/S.	61
5.6	Resposta em frequência (C4 - cápsula omnidireccional).	63
5.7	Resposta em frequência (C4 - cápsula cardióide.)	63
5.8	Resposta no tempo (LSD2 - cápsula inferior).	64
5.9	Resposta em frequência (LSD2 - cápsula inferior).	64
5.10	Resposta no tempo, AKG C426B, cápsula inferior.	65
5.11	Resposta em frequência, AKG C426B, cápsula inferior.	65
5.12	Técnica AB.	66
5.13	Resposta no tempo, técnica AB, 0°.	67
5.14	Resposta no tempo, técnica AB, 45°.	67
5.15	Resposta no tempo, técnica AB, 90°.	67
5.16	Resposta em frequência, técnica AB, 0°.	68
5.17	Resposta em frequência, técnica AB, 45°.	68
5.18	Resposta em frequência, técnica AB, 90°.	68

5.19	RI - conversão mono, técnica AB, 90°	69
5.20	Resposta em frequência, conversão mono, técnica AB.	69
5.21	Resposta no tempo, técnica XY, AKG, 0°	70
5.22	Resposta no tempo, técnica XY, AKG, 45°	70
5.23	Resposta em frequência, técnica XY, AKG, 0°	71
5.24	Resposta em frequência, técnica XY, AKG, 45°	71
5.25	Resposta em frequência da conversão mono, técnica XY.	71
5.26	Resposta no tempo, técnica M/S, LSD2, 0°	72
5.27	Resposta no tempo, técnica M/S, LSD2, 45°	72
5.28	Resposta no tempo, técnica M/S, LSD2, 90°	72
5.29	Resposta em frequência, técnica M/S, LSD2, 0°	73
5.30	Resposta em frequência, técnica M/S, LSD2, 45°	73
5.31	Resposta em frequência, técnica M/S, LSD2, 90°	73
5.32	Resposta no tempo, técnica M/S, AKG C426B, 0°	74
5.33	Resposta em frequência, técnica M/S, AKG C426B, 0°	74
C.1	Componentes que constituem a toolbox <i>data acquisition</i>	82
C.2	Resultado do sinal captado no domínio da frequência.	86
C.3	Resultado do sinal captado no domínio da frequência, ampliado.	86
D.1	Microfone Behringer ECM8000.	87
D.2	Microfone Sennheiser 541.	88
D.3	Microfone Shure Prologue 10L.	88
D.4	Microfones Studio Project C4.	89
D.5	Microfone Studio Project LSD2.	89
D.6	Microfone AKG C426B.	90
D.7	Caixa de selecção da direcionalidade do microfone AKG C424B.	90
E.1	Esquema da montagem para medição da resposta de microfones.	92
E.2	Interface para medição de microfones.	93

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

Em 2006, no 8º Encontro da APEA, José Fortes, um dos mais conceituados técnicos de som do nosso país, proferiu a palestra “os meus ses”, que evidenciava como a área de Áudio é fértil em questões controversas que carecem de explicação objectiva e sustentada em moldes científicos.

Inspirado nessa palestra, nasceu o projecto *Fortius*, que visa estudar de forma objectiva a influência dos microfones e seu posicionamento na captação de som e, a essa luz, avaliar e discutir critérios práticos de posicionamento de microfones, nomeadamente em captação estereofónica. O objectivo final seria traduzir algoritmicamente os critérios subjectivos e construir um sistema capaz de encontrar o ponto “óptimo” de captação de forma automática.

O posicionamento do microfone é um factor determinante para a qualidade de uma captação de som, mas só pode ser considerado em combinação com outras variáveis, tais como o tipo de microfone, as características acústicas da sala e as características e posicionamento da fonte sonora. O assunto torna-se assim tão complexo que é inevitável o uso de critérios empíricos subjectivos, em torno dos quais surge controvérsia.

Este trabalho surge no seguimento de várias dissertações já realizadas no âmbito do projecto *Fortius* e foca sobretudo a caracterização objectiva de microfones (medição da resposta impulsional) e a avaliação de diversas técnicas comumente empregues em captação estéreo.

Um ponto de partida para a abordagem à caracterização de microfones e do seu posicionamento consiste no estudo do pistão circular plano. A modelação deste transdutor - embora ideal, i.e., baseado em pressupostos teóricos inatingíveis na realidade [6] - permite compreender e prever os aspectos essenciais do comportamento de um microfone real.

O microfone ideal caracteriza-se por uma resposta em frequência plana em todas as direcções de captação, não introduzindo qualquer coloração numa gravação. Na realidade, porém, o microfone e o seu posicionamento alteram o sinal sonoro captado. De especial importância é o facto de a resposta do microfone variar com a sua orientação relativamente à fonte sonora (*directividade* ou *directividade*).

A influência destes dois factores - microfone e posicionamento - é difícil de prever até porque os fabricantes geralmente fornecem apenas a resposta axial. A resposta axial vai ser definida neste ponto e este conceito utilizado ao longo de todo o trabalho. Considera-se a resposta axial como sendo o posicionamento em que existe uma linha que une a fonte e o microfone, tal como exemplifica a figura 1.1. A orientação do microfone neste posicionamento

caracteriza-se por possuir 0° tanto de elevação (θ), como de azimute (ϕ). A vista lateral permite definir o ângulo de elevação, enquanto a vista superior o ângulo azimutal. Como não alteramos a elevação ao longo do trabalho esta assumirá sempre o valor $\theta = 0^\circ$, mesmo que omissa. O azimute, ϕ , será então usado para definir o deslocamento. Estes ângulos não correspondem a uma movimentação do microfone no seu todo, mas sim a um deslocamento sobre o seu próprio eixo, de forma a que apenas o ângulo de incidência das ondas sonoras na cápsula se altere (ver figura 3.12).

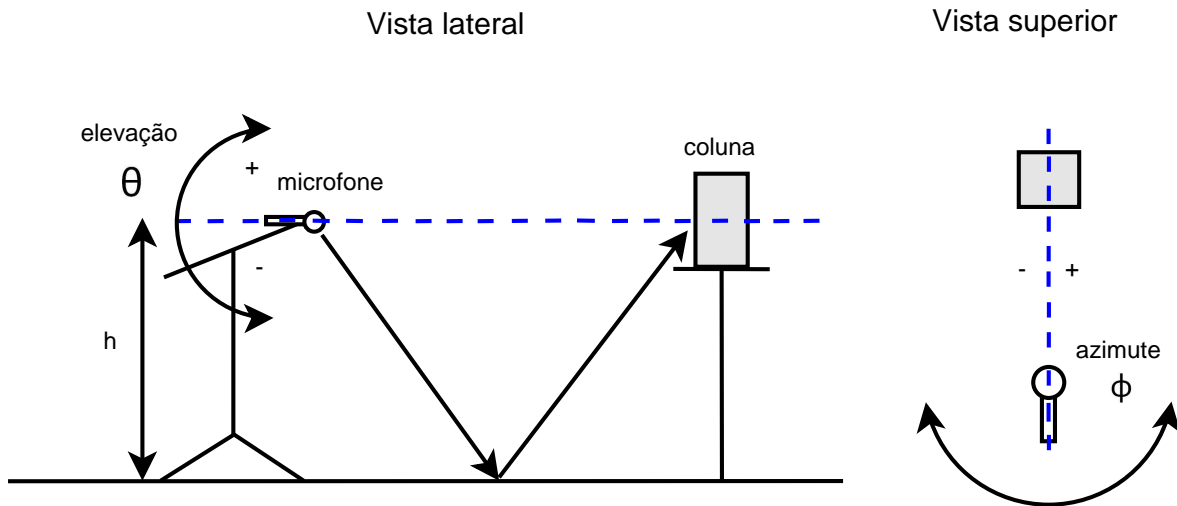


Figura 1.1: Eixo sonoro.

Além da resposta axial em frequência, os fabricantes fornecem alguns gráficos polares para frequências discretas, faltando alguma informação para ângulos em que $\phi \neq 0^\circ$ em toda a gama audível, [20Hz-20kHz]. Para comprovar e simultaneamente enriquecer a informação fornecida pelos fabricantes é importante encontrar forma de medir microfones.

Surge assim a necessidade de se quantificar os efeitos introduzidos por um microfone numa captação. Para realizar esta quantificação é necessário o desenvolvimento de um sistema de medição de microfones, o que não é trivial e exige a consideração de muitos aspectos.

Primeiramente, temos que analisar quais as ferramentas necessárias: um altifalante (para reprodução do sinal de excitação), uma placa de som, um amplificador, PC, cabos e microfone a medir são indispensáveis. Uma sala anecóica (sala onde idealmente não existem reflexões do som) é também necessária, para medir apenas a resposta do microfone, isolando-a da da sala.

Mesmo em condições anecóicas a realidade é que quando medimos a resposta impulsional do microfone estamos a medir toda a cadeia de medida (engloba a coluna, passando pelos aparelhos eléctricos - amplificador e placa de som, cabos e o microfone). A sala anecóica disponível não apresenta completa ausência de reflexões de som, sendo por isso a sua utilização descartada. Recorreu-se a outro processo, que consiste no recurso a condições *quasi*-anecóicas, onde se pode truncar a resposta impulsional obtida (sob determinadas condições), separando a resposta da sala da restante cadeia de medida.

Observando a figura 1.1 é possível prever a primeira reflexão, que neste caso provém do solo da sala. Existe uma diferença temporal entre a chegada do som directo e da primeira reflexão que, deverá ser suficiente para que a resposta impulsional dos transdutores já seja

insignificante (em amplitude), quando se capta a primeira reflexão; um pouco antes da chegada desta trunca-se a resposta medida eliminando completamente a sala. Este método denomina-se de *quasi*-anecóico devido à inexistência da contribuição da sala na resposta impulsional medida, simulando-se assim condições anecóicas.

Para isolar a resposta impulsional do microfone da restante cadeia de medida não podemos recorrer a uma simples truncatura do sinal no tempo. É necessário recorrer a um método comparativo, onde é usado um microfone de medição como referência. Um microfone de medição deve possuir uma resposta em frequência o mais plana possível, i.e., todas as frequências são captadas de igual forma pelo microfone. Um microfone pouco dispendioso e largamente aconselhado na literatura como sendo um bom microfone de medição é o Behringer ECM8000, tendo sido este usado por nós como referência para medição de outros microfones.

O fabricante diz-nos que o microfone usado como referência possui uma resposta plana para captações a 0° , vamos considerar este pressuposto completamente verdadeiro. Na posse de um microfone de medição de maior qualidade, consequentemente mais dispendioso, poderíamos obter resultados potencialmente mais rigorosos. Após medir todas respostas em condições *quasi*-anecóicas (tanto para o microfone de referência, para ângulos diferentes da direcção axial ($\phi \neq 0^\circ$), como para outros microfones) vamos compensá-las com a resposta axial do microfone de referência (Behringer ECM8000).

A medição individual de microfones é extremamente importante, levando inevitavelmente à medição de configurações estéreo. Estas técnicas envolvem posicionamentos oblíquos de microfones, que podem sob determinadas condições provocar colorações na captação do som. Na posse de ferramentas que permitam medir microfones estéreo podemos procurar justificação para os fenómenos audíveis, impostos pelos microfones/técnicas.

Após a discussão de alguns pontos com o conceituado técnico de som José Fortes, ouvimos alguns aspectos interessantes sobre captações de som, que consequentemente levantam questões tais como:

- Na gravação de uma orquestra, como consegue um técnico com um único microfone estéreo captar mais ou menos um determinado naipe de instrumentos, simplesmente elevando ou baixando o microfone?
- Será possível efectuar uma captação com igual qualidade com um microfone de baixo custo, e conseqüente menor qualidade, e com outro microfone várias vezes mais dispendioso?
- O posicionamento será muito mais importante que o próprio microfone?
- Quais são os critérios que influenciam a selecção de uma técnica estéreo para uma captação?

O problema que deu corpo a esta dissertação é então o porquê dos técnicos de som fazerem escolhas tão subjectivas. Descobrir de forma científica o que distingue as técnicas de captação estéreo entre si. Apesar de alguma documentação sobre as principais vantagens e desvantagens de cada técnica e mesmo sobre os próprios microfones, existe ainda muita informação não revelada que é importante explorar.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

- No capítulo dois é apresentada a simulação de um pistão circular plano. É efectuado um estudo sobre este modelo teórico com vista a uma comparação com os microfones reais. Aborda-se a tipificação de microfones e a caracterização normalmente apresentada pelos fabricantes, nomeadamente em termos de resposta direccional. É explicado o conceito de microfone de referência muito importante para o desenvolvimento deste trabalho.
- O capítulo três descreve a metodologia seguida para a medição de microfones. Inicialmente apresentam-se os conceitos matemáticos inerentes à medição de respostas impulsionais. É apresentada uma explicação detalhada do método de medição adoptado. A sua implementação é explanada desde o princípio de funcionamento até às rotinas e funções criadas para o cálculo da resposta a impulso.
- No capítulo quatro são apresentados alguns resultados da medição prática de microfones. Foram medidos três microfones e a sua resposta no tempo e em frequência é apresentada, comparando sempre que possível os resultados obtidos com a informação fornecida pelo fabricante. Os resultados são obtidos em duas situações distintas: anecóicas e *quasi*-anecóicas.
- No capítulo cinco é feito um estudo sobre captações estéreo. As várias técnicas são revistas e comparadas. São medidos três microfones estéreo e analisados os seus resultados.
- O capítulo seis apresenta as conclusões do trabalho realizado, discutindo os resultados obtidos. São enunciadas algumas recomendações para trabalho futuro.

Capítulo 2

Microfones

2.1 Modelação

2.1.1 Radiação de um pistão circular plano

O estudo do pistão circular plano (figura 2.1) é de grande interesse, pois ele pode ser visto como a base de muitos transdutores (altifalantes, microfones) usados na prática. O conceito de reciprocidade acústica [6] permite obter resultados aplicáveis independentemente de o pistão actuar como radiador ou receptor.

Trata-se de uma estrutura idealizada mas, ainda assim, a obtenção de um modelo matemático em forma fechada só é possível para situações particulares, nomeadamente o campo afastado (*far field*) [6]. O nosso interesse vai de encontro a este pressuposto, pois vamos focar-nos na simulação de um transdutor a uma distância da fonte muito maior que o seu próprio raio (*far field*).

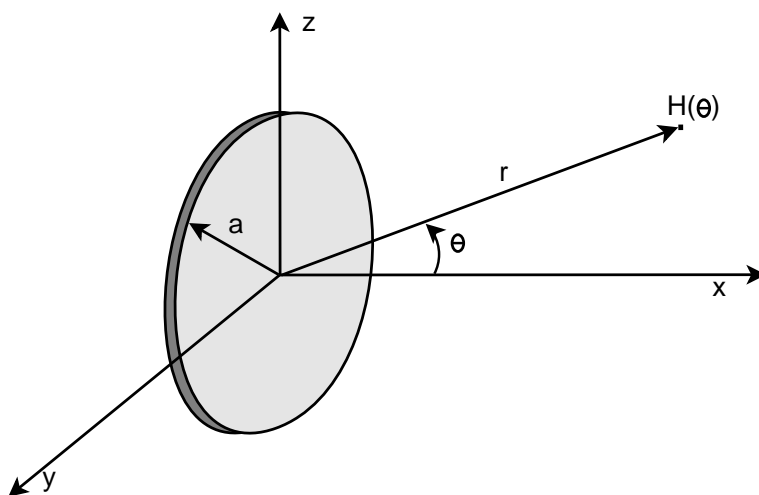


Figura 2.1: Modelo circular de um pistão acústico.

Existem várias definições usadas para descrever os aspectos mais importantes do campo acústico, sem necessidade da descrição integral do padrão de radiação (factor direccional, *beam pattern*, *beam width*, nível da fonte, índice de directividade, entre outros).

Como nos interessa quantificar o efeito do posicionamento de um microfone numa captação sonora vamos apenas analisar o factor direccional H . Este factor representa a influência do posicionamento de um transdutor e o seu valor varia, no nosso estudo, com a orientação do microfone em relação à fonte sonora.

O factor direccional é normalizado podendo assim o seu valor variar entre 0 e 1. A direcção em que $H=1$ determina o eixo acústico. Um “eixo” acústico pode ser uma linha, um plano ou uma superfície cónica.

O factor direccional pode ser definido pelos ângulos θ e ϕ , elevação e azimuth respectivamente, $H(\theta, \phi)$. Como o modelo do pistão é ideal podemos descrever o seu comportamento apenas com um ângulo. Para a simulação do pistão o ângulo θ não corresponde ao ângulo definido para a elevação, mas sim ao ângulo definido na figura 2.1. θ é o ângulo entre o eixo x e a recta que une o ponto onde queremos determinar H e o centro do pistão. Para qualquer ponto, com o mesmo raio (r) e com o mesmo ângulo (θ), H assume o mesmo valor [6].

Simulação do pistão circular

A directividade (ou direccionalidade) é uma das características mais importantes de um microfone. Representa a sensibilidade com que o microfone responde em função do ângulo formado entre ele e a fonte sonora e é representada em gráficos polares. Geralmente varia com a frequência captada.

A medição analítica da directividade em função da direcção e comprimento de onda permite compreender as técnicas usadas para a captação estéreo, onde existem configurações com o posicionamento oblíquo de microfones, relativamente à fonte sonora, sem que exista justificação objectiva para esta colocação. Poderemos assim, com este estudo qualificar as técnicas mais usadas nestas captações, de forma rigorosa e com suporte em fundamentos matemáticos. Justifica-se assim a simulação de um modelo de um transdutor, com o intuito de perceber qual a importância do posicionamento de um microfone numa captação sonora.

O modelo do transdutor pode ser simulado usando uma função aproximada, que é válida para $r \gg a$ (campo distante do pistão) [6]. Estudou-se e simulou-se o modelo de um pistão circular plano descrito na figura 2.1, com dois parâmetros a variar, o θ (ângulo formado pela perpendicular ao pistão e a direcção da proveniência do som) e λ (comprimento de onda do sinal sonoro captado).

A resposta do pistão em função do ângulo θ , formado entre o seu eixo e a recta que o une à fonte, é designada factor direccional (H). Depende também dos parâmetros a - raio do pistão e λ - comprimento de onda; sendo dado pela expressão:

$$H(a, \lambda, \theta) = 2 \frac{J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin(\theta)} \quad (2.1)$$

onde J_1 é uma função de Bessel do primeiro tipo de ordem 1.

As características de directividade podem ser especificadas com recurso ao factor direccional [4].

A equação 2.1 é uma aproximação normalizada para o sistema. No caso real será necessário acrescentar ainda mais uma componente:

$$H(a, \lambda, \theta, b) = H(a, \lambda, \theta)(b + (1 - b)\cos\theta) \quad (2.2)$$

A nova componente inserida, $(b + (1 - b)\cos\theta)$, é uma aproximação empírica que pretende simular o ambiente circundante ao pistão. O valor desta componente pode ser obtido por

comparação com uma resposta medida. Transdutores reais possuem uma protecção do pistão, no caso dos microfones geralmente uma cápsula enquanto altifalantes uma caixa [24]. Estes introduzem alguma atenuação do sinal, sobretudo lateral e na rectaguarda do transdutor. No caso dos altifalantes é usual recorrer a esta componente para simular e construir caixas acústicas, que introduzam alguns fenómenos pretendidos [8].

O objectivo é a compreensão do modelo básico do pistão acústico, portanto não simulamos os artefactos introduzidos pelas reflexões, por exemplo, da cápsula de um microfone. Assim esta componente foi ignorada, levando a uma simplificação significativa das operações aritméticas [9].

Considerações matemáticas

Para simular o sistema descrito pela equação 2.1, o Matlab possui uma função denominada BESSELJ(NU,Z), que efectua a função de Bessel de primeiro tipo (Z=1) e neste caso de ordem 1 (NU=1). Sendo assim não é complicado efectuar as operações algébricas. Temos que criar uma matriz onde colocar os valores do resultado em função de λ e θ .

Existe um problema que é necessário não desprezar pois é significativo para os resultados, no caso em que o denominador da função H é zero (para $\sin(\theta) = 0$), ficamos com uma indeterminação $\frac{0}{0}$; é então preciso levantar essa indeterminação para obter o valor correcto para este ponto.

$$\lim_{\sin(\theta) \rightarrow 0} H(a, \lambda, \theta) = \lim_{\sin(\theta) \rightarrow 0} 2 \frac{J_1(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin(\theta))}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin(\theta)} \quad (2.3)$$

Para resolver este limite deriva-se o numerador e o denominador (usa-se a regra de Cauchy). Podemos ignorar todos os valores fora do intervalo $[0 - 90^\circ]$ pois apenas simulamos esta gama (as restantes serão simétricas), assim sendo o único ponto crítico será mesmo para $\sin(\theta) = 0$. A partir de literatura matemática [25] sabemos que a derivada da função de Bessel:

$$[J_1(x)]' = J_0(x) - \frac{J_1(x)}{x} \quad (2.4)$$

Ou então a partir do Matlab, usando notação simbólica, temos:

```
>> syms x
>> diff(besselj(1,x))
ans =
besselj(0,x)-1/x*besselj(1,x)
```

$$\lim_{x \rightarrow 0} [J_1(x)]' = \lim_{x \rightarrow 0} \left[J_0(x) - \frac{J_1(x)}{x} \right] = \lim_{x \rightarrow 0} J_0(x) - \lim_{x \rightarrow 0} \frac{J_1(x)}{x} \quad (2.5)$$

Para $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{J_1(x)}{x}$ temos novamente a indeterminação $\frac{0}{0}$, aplica-se a regra de *Cauchy*:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{J_1(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} J_1(x)' \quad (2.6)$$

$$2 \lim_{x \rightarrow 0} [J_1(x)]' = \lim_{x \rightarrow 0} J_0(x) \quad (2.7)$$

Para calcular $J_0(x)$, quando $x = 0$, usamos a expressão geral pois não se trata de uma indeterminação:

$$J_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(n\tau - x \sin \tau) d\tau \quad (2.8)$$

Função de Bessel de ordem zero, $n = 0$:

$$J_0(0) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(0\tau - 0 \sin \tau) d\tau = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(0) d\tau = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\tau = \frac{1}{\pi} \pi = 1 \quad (2.9)$$

Então:

$$2 \lim_{x \rightarrow 0} [J_1(x)]' = J_0(0) \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow 0} [J_1(x)]' = \frac{1}{2} \quad (2.10)$$

$$H(x) = 2 \frac{J_1(x)'}{x'} = 2 \frac{1}{2} = 1, \quad \forall x = 0 \quad (2.11)$$

Portanto para qualquer θ em que $\sin(\theta) = 0$ sabemos que o valor da expressão representativa do factor direccional assume o valor 1. Estamos em condições de simular no Matlab o sistema, de forma a conhecer o factor direccional $H(a, \theta, \lambda)$ em função do ângulo de captação θ e do comprimento de onda captado λ .

2.1.2 Simulação no Matlab

Resultados

O som é toda a variação de pressão geralmente do ar (mas pode ser de um líquido, sólido ou qualquer gás), que o ouvido humano consegue detectar. Propaga-se a 344m/s no ar a 20° C, e o seu comprimento de onda deriva da sua velocidade e frequência, $\lambda = \frac{c}{f}$. A gama de simulação está compreendida entre os 20Hz e os 20kHz, esta é a zona de interesse, onde o ouvido Humano de um sujeito perfeitamente saudável consegue captar as ondas sonoras [18]. Vamos nestas condições simular a variação do factor direccional em função do:

- ângulo
- frequência

Admitiu-se um raio de 1cm para o pistão em todas as simulações, semelhante aos microfones existentes no laboratório.

Analisando os gráficos da figura 2.2, podemos observar a variação da resposta em frequência com a direcção. Na gama audível, 20Hz-20kHz sensivelmente, o comportamento do transdutor deverá seguir o indicado na figura 2.2, para diferentes ângulos de captação. É importante frisar que o comportamento da função de Bessel é semelhante ao da função *sinc* e a equação usada nesta simulação tem por base uma função de Bessel de primeiro tipo, como o indicado pela equação 2.1.

Para $\theta=0^\circ$ não existe qualquer variação da factor direccional, independentemente da frequência captada. Podemos afirmar que a resposta esperada de um microfone captando frontalmente voltado para a fonte sonora deverá ser livre de qualquer efeito atenuador. O factor direccional neste caso assume sempre o valor absoluto de 1, para todas as frequências simuladas.

Com um posicionamento oblíquo em relação à fonte sonora de $\theta=30^\circ$, existe um efeito atenuador que se revela significativo a partir de sensivelmente 5kHz e que cresce no sentido do aumento da frequência. O factor direccional atinge o valor aproximado de 0.65 a 20kHz.

Aumentando o ângulo de captação para $\theta=60^\circ$, obtemos resultados semelhantes aos anteriores (30°), mas com um acentuar do efeito atenuador. Neste caso o valor do factor direccional é de cerca de 0.2 para 20kHz.

Finalmente quando o transdutor é colocado perpendicularmente à fonte sonora, obtemos os piores resultados para os valores do factor direccional em função do ângulo. A 20kHz o seu valor é muito próximo de 0.

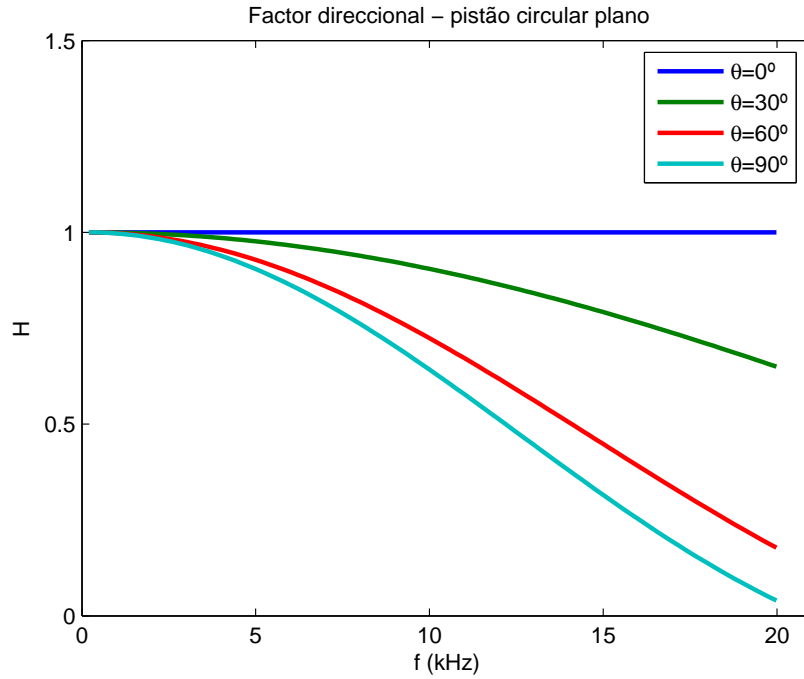


Figura 2.2: Variação da resposta em frequência com a direcção.

É importante referir que o comportamento da função simulada é simétrico, os resultados são os mesmos para $\theta=x$ e $\theta=-x$, onde x é um qualquer ângulo.

Após esta análise, é seguro afirmar que o factor direccional depende do ângulo de captação e também da frequência captada. Assim a melhor captação será a efectuada com o microfone direccionado frontalmente à fonte sonora. Se variarmos o ângulo de captação existe um factor direccional que atenua o som captado de forma desigual, sendo as frequências mais elevadas as que mais sofrem este efeito atenuador. Para baixas frequências, inferiores a 2kHz, praticamente não existe este fenómeno.

Uma outra forma de apresentar os resultados obtidos neste estudo consiste no uso de um gráfico polar. A figura 2.3 mostra 4 gráficos polares para 5kHz, 10kHz, 15kHz e 20kHz, onde podemos para cada uma destas frequências observar a directividade do transdutor para uma gama angular de $\theta=-90^\circ$ a $\theta=90^\circ$. Enquanto na figura 2.2 conseguíamos uma melhor percepção da influência da frequência no factor direccional, com um gráfico polar temos uma ideia mais clara da importância do ângulo de captação. É visível na figura 2.3 que para frequências inferiores a 5kHz é insignificante o efeito atenuador imposto pelo ângulo de captação. Para

frequências mais elevadas esse efeito é mais saliente, sendo que no caso extremo da frequência do som captado ser aproximada de 20kHz e a captação perpendicular ao eixo formado pela fonte sonora e o microfone o factor direccional toma um valor muito próximo de 0.

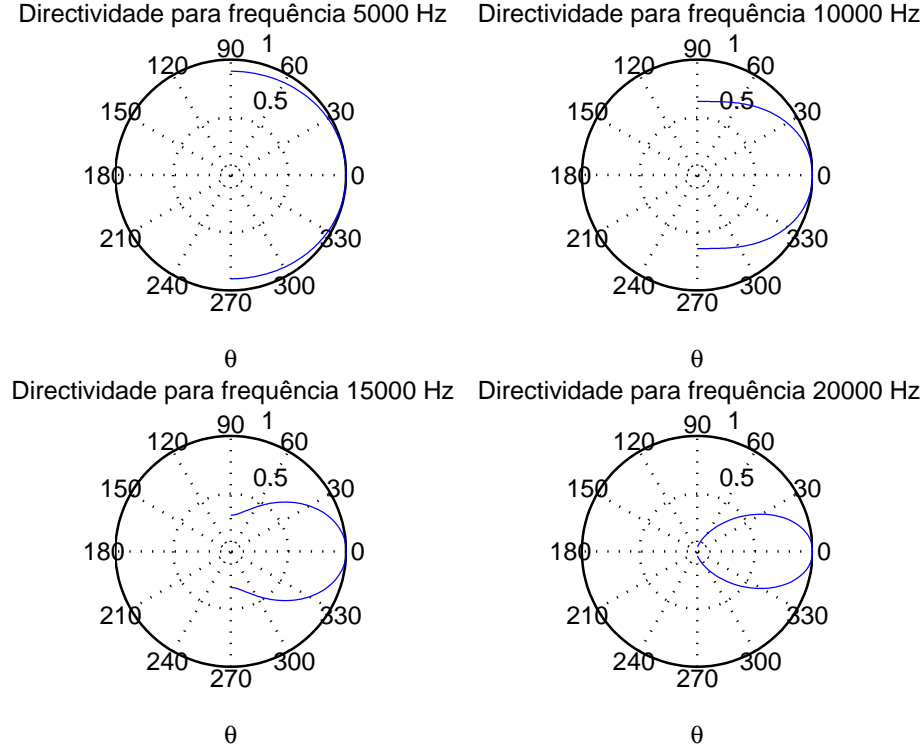


Figura 2.3: Variação da directividade com o ângulo.

Com os resultados demonstrados na figura 2.2 e na figura 2.3 extraímos uma ideia muito clara, o factor direccional só se afasta significativamente de 1 conjugando dois factores: para frequências elevadas (tendo em conta a gama audível), e ao mesmo tempo para ângulos de captação próximos da perpendicular ao eixo formado pelo microfone e a fonte. A resposta de um microfone será portanto heterogénea e efectua distinção do som captado, sendo que os sinais sonoros mais agudos poderão ser alvo de fenómenos que alteram o seu conteúdo enquanto os sinais mais graves estarão menos sujeitos à influência da resposta do microfone.

Para reforçar os resultados obtidos, na figura 2.4 fez-se um mapeamento do comportamento do factor direccional, onde de facto verificamos o que anteriormente foi referido, é necessário conjugar dois factores, frequências elevadas e um mau ângulo de captação, para que o valor normalizado de H seja significativamente inferior a 1, entenda-se que um mau ângulo de captação é um ângulo afastado de $\theta=0^\circ$ e próximo de $\theta=90^\circ$, em valor absoluto. Com uma resolução em dB ficamos com uma ideia mais nítida dos resultados, esta imagem demonstra de uma forma global o comportamento do factor direccional.

Apreciação dos resultados

Para compreender se existe ou não relevância nos resultados obtidos é importante relembrar que a gama audível situa-se entre os 20Hz e os 20kHz, e pelos resultados das simulações

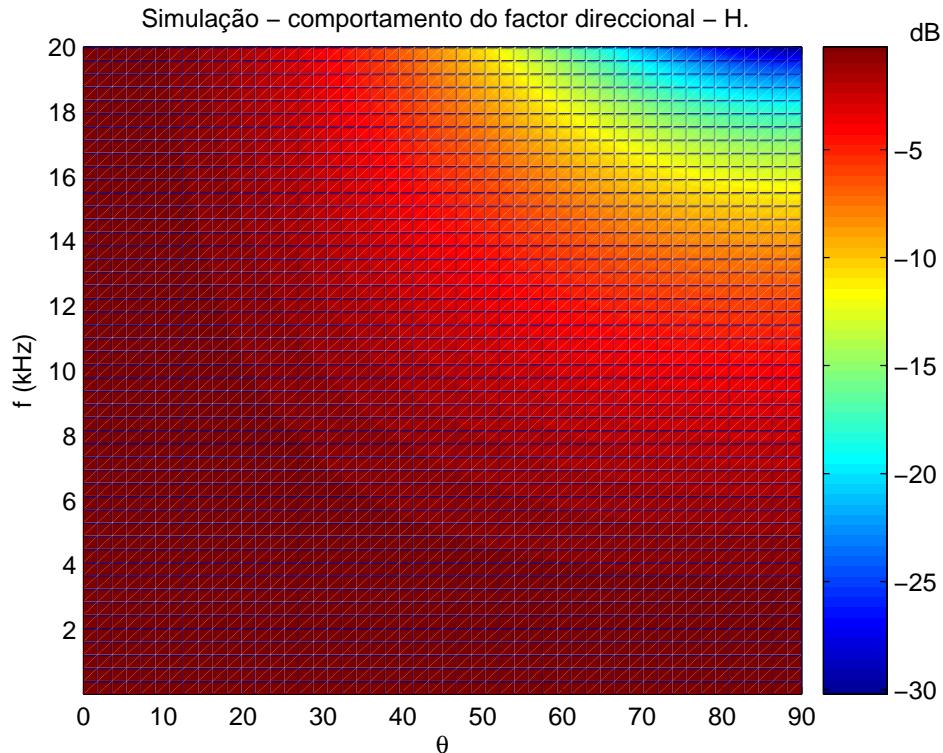


Figura 2.4: Mapeamento da resposta de um microfone em função do ângulo e da frequência.

realizadas chegamos a uma conclusão muito objectiva, as captações sonoras podem ser afectadas por um ângulo de captação não óptimo, embora os efeitos sejam apenas notórios para frequências elevadas.

Normalmente uma gravação áudio abrange uma gama de frequências que não se aproxima das que mais sofrem com a resposta do microfone. Existem inúmeras gravações que hoje em dia são realizadas, desde cantores a solo ou com instrumental, música clássica e música contemporânea, conferências, oradores, entre muitas outras. É importante saber que gamas de frequências são captadas para que seja possível prever e perceber qual o impacto da resposta de um microfone. Na Tabela 2.1 temos alguns dos instrumentos mais comuns, além de também considerarmos a voz humana, onde é possível identificar a frequência fundamental e os respectivos harmónicos de cada uma destas fontes sonoras.

Focando as frequências fundamentais de cada instrumento verificamos que raramente atingem valores para os quais a resposta do microfone possa ser significativa na captação. Contudo, um ouvinte conhecedor de música com um ouvido educado pode numa captação de piano, por exemplo, notar que existem pequenas distorções do sinal áudio original. Os harmónicos são muito importantes para que um instrumento possua o timbre e a sonoridade que lhe é característica, e se nos centrarmos nesta região do espectro, vemos na tabela que existem muitos instrumentos que entram numa zona de frequências já amplamente afectada pela resposta do microfone. O caso extremo é o do tambor cujo os seus harmónicos podem atingir a frequência de 20kHz, que como provamos, para captações oblíquas à fonte sonora podem ser muito afectados. Assim, apesar de ligeiros, existem fenómenos que podem com-

Tabela 2.1: Alguns instrumentos e respectivas frequências do som que produzem [16].

Instrumento (fonte sonora)	Frequência fundamental (Hz)	Harmónicos(kHz)
Flauta	261-2349	3-8
Oboé	261-1568	2-12
Clarinete	165-1568	2-10
Trompete	165-988	1-7.5
Trombone	73-587	1-4
Tuba	49-587	1-4
Tambor	100-200	1-20
Bombo	30-147	1-6
Pratos	300-587	1-15
Violino	196-3136	4-15
Viola	131-1175	2-8.5
Baixo acústico	41-294	1-5
Guitarra acústica	82-988	1-15
Guitarra eléctrica (amplif.)	82-1319	1-3.5
Guitarra eléctrica (directa)	82-1319	1-15
Piano	28-4196	5-8
Sax alto	175-698	2-12
Sax tenor	131-494	1-12
Cantor	87-392	1-12

prometer uma captação sonora, quando esta não tem em conta o ângulo de captação, o que quando procuramos qualidade áudio elevada pode ser importante e não desprezável, não só para um apreciador de música e com elevados conhecimentos musicais como também para qualquer comum ouvinte. Podem ser introduzidos artefactos que distorcem a realidade do som captado.

É importante realçar que o modelo do pistão circular plano é muito melhor do que a realidade dos transdutores, pois este é um modelo ideal [6] [4], assim estes resultados podem ser diferentes dos realmente obtidos na prática, onde a resposta do microfone pode ainda ser mais significativa nas captações do que o inferido pela simulação realizada.

2.1.3 Posicionamento virtual de microfones

No seguimento do trabalho de simulação efectuado anteriormente, surge a necessidade da construção de uma aplicação que permita a um utilizador ter a noção, se possível em tempo real, da importância da direcção na qualidade de uma captação sonora.

Vamos usar as respostas do microfone obtidas por simulação usando a expressão matemática 2.1. Posteriormente vamos medir, com o recurso à sala anecóica e também a uma sala vulgar, as respostas de um microfone real. Poderemos então comparar o nosso modelo do pistão com a realidade de um verdadeiro microfone.

A aplicação pretendida deverá simular a movimentação de um microfone, segundo um percurso pré-definido. A orientação do pistão irá assim variar entre $\theta=-90^\circ$ e $\theta=90^\circ$. Como

o modelo simulado é simétrico não necessitamos das respostas para ângulos negativos. O objectivo será simular os fenómenos introduzidos numa captação, por um microfone, neste caso um modelo ideal - pistão circular plano. Na posse desta simulação será mais fácil perceber qual a influência do microfone na captação.

Uma primeira abordagem para a escrita do algoritmo é efectuada com o auxílio do Matlab, que constitui sempre uma forma mais simples e rápida para a elaboração de um primeiro protótipo da aplicação a construir. Geralmente é mais rápido do que por exemplo o recurso à linguagem C, por ser mais simples e possuir inúmeras funções que trazem vantagens à escrita de algoritmos de processamento de sinal, tais como as funções *fft*, *ifft*, *conv*, *xcorr*, entre muitas outras. Contudo dificilmente se conseguem aplicações a operar em tempo real, devido aos produtos internos extensos a que algumas das funções citadas anteriormente recorrem. Assim no Matlab vamos predefinir um percurso a percorrer pelo microfone, e observar os resultados.

Movimentação do microfone

Para criar a aplicação pretendida temos que enunciar todos os factores inerentes ao processamento que possam causar problemas. Vamos dividir um sinal áudio em blocos, de um determinado tamanho, por exemplo 1024 amostras. A escolha de um número cujo valor seja resultado de um expoente de 2 não é aleatório, é feita tendo em conta que no Matlab vamos recorrer a algoritmos que usam *fft*, tiramos assim máximo partido destes. Esta divisão pode ser feita de um ficheiro áudio existente, ou podemos ler em tempo real, esperar que um *buffer* de entrada possua o número de amostras por nós determinado, medir o ângulo de captação, e de seguida proceder ao seu processamento.

A cada 1024 amostras verificamos qual o ângulo em que se encontra o microfone, e calcula-se a convolução do bloco respectivo e a resposta para o ângulo medido. O resultado da convolução de um sinal com a amostras com outro de b amostras possui $a + b - 1$ amostras. As $b - 1$ amostras mais que o sinal final possui relativamente ao sinal inicial consideramos como sendo a cauda da convolução. Esta cauda tem que ser guardada e somada no início próxima iteração (nas primeiras $b - 1$ amostras do resultado seguinte da convolução). A convolução é a operação matemática descrita pela equação 2.12.

$$f * g = \sum_{k=0}^{+\infty} f(k)g(n - k) \quad (2.12)$$

O procedimento adoptado pode ser explicado através da figura 2.5.

Por cada bloco de 1024 amostras efectuamos a convolução com a resposta do microfone/pistão nessa posição. h_1 e h_2 representam duas respostas de microfones que podem ser ou não iguais, consoante haja ou não deslocamento do microfone. N_0 indica o tamanho de cada bloco e N o tamanho total do sinal áudio original.

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n - k) \quad n \in [0 \dots +\infty] \quad (2.13)$$

Para $n \geq N_0$ $h = h_2$ e para $n < N_0$ $h = h_1$.

Assim, e à luz da figura 2.5, podemos definir a passagem de uma resposta do microfone para outra:

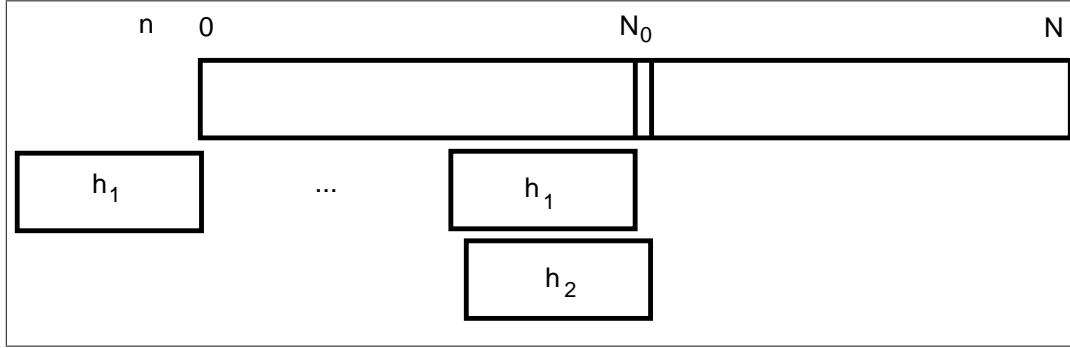


Figura 2.5: Convolução com sucessivas respostas.

$$y(N_0 - 1) = \sum_{k=0}^{N-1} h_1(k)x(n - k) \quad (2.14)$$

$$y(N_0) = \sum_{k=0}^{N-1} h_2(k)x(n - k) \quad (2.15)$$

Este processamento de diferentes respostas do pistão, efectuado por blocos, causa *clicks* no sinal final, como podemos ver na figura 2.6.

Podemos demonstrar matematicamente a existência deste fenómeno. Seja y_1 e y_2 resultado da convolução de um sinal com h_1 e com h_2 respectivamente:

$$y_1(N_0) = \sum_{k=0}^{N-1} h_1(k)x(n - k) \quad (2.16)$$

$$y_2(N_0) = \sum_{k=0}^{N-1} h_2(k)x(n - k) \quad (2.17)$$

d é a diferença entre os dois resultados, $y_2(N_0)$ e $y_1(N_0)$.

$$d = y_2(N_0) - y_1(N_0) = \sum_{k=0}^{N-1} [h_2(k) - h_1(k)]x(n - k) \quad d = 0 \leftrightarrow h_1 = h_2 \quad (2.18)$$

Prova-se que não existirão *clicks* se, e só se, $h_1 = h_2$.

Para eliminar estes artefactos introduzidos pelo processamento efectuado é necessário proceder a uma interpolação entre blocos consecutivos.

Na figura 2.6 efectuou-se a convolução do primeiro bloco com a primeira resposta do microfone e depois o segundo bloco com a segunda resposta. A primeira resposta é para $\theta = 0^\circ$ e a segunda para $\theta = 45^\circ$. Esta descontinuidade é a responsável pelos *clicks* audíveis. Os ângulos foram escolhidos tendo em conta que o movimento do microfone nunca poderá ser instantâneo e o pior caso seria passar de 0° para 90° . Esta transição teria que ocorrer em cerca de 1024/44100 segundos, dado que a frequência de captação é de 44,1kHz e cada bloco possui 1024 amostras. Tal não é exequível do ponto de vista prático e não faz sentido

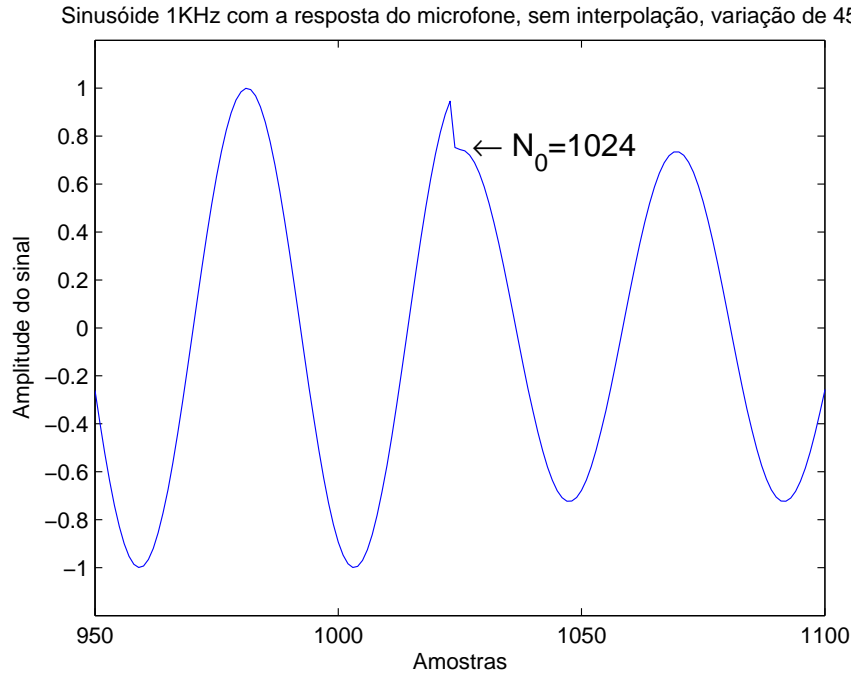


Figura 2.6: Exemplo de descontinuidade num sinal sinusoidal entre dois blocos de 1024 amostras, após o processamento.

considerar este caso, seria uma transição muito abrupta da posição do microfone. Escolheu-se que a transição mais brusca que poderá ocorrer é de 45°, sendo este um valor mais razoável. Contudo mesmo para uma transição de 0° para 90° é possível eliminar os *clicks* audíveis.

2.1.4 Interpolação

A interpolação consiste em tornar a transição abrupta entre os dois blocos de sinal numa transição mais suave. Esta pode ser efectuada de duas formas:

- interpolar primeiro as respostas do microfone e somente depois proceder à convolução;
- convolução dos sinais com as respostas dos microfones e só depois proceder à interpolação;

O método utilizado que permite a interpolação e consequente eliminação dos fenómenos indesejados pode ser explicado da seguinte forma: sabemos o ângulo actual do microfone e o ângulo anterior, assim retiramos a resposta do microfone actual e a anterior. Para o sinal a processar (bloco actual), procedemos à sua convolução com as duas respostas referidas anteriormente. A interpolação pode ser realizada entre as respostas ou entre as convoluções. Para os dois casos é necessário sempre realizar a interpolação que consiste numa transição suave entre ou as duas respostas ou as duas convoluções.

Interpolação das respostas do microfone

Para o primeiro caso, em que primeiro efectuamos a interpolação entre as respostas, podemos representar o sistema pelo diagrama de blocos da figura 2.7. Neste caso não podemos no Matlab recorrer à função *conv.m* tal como está implementada, pois esta não permite ir alterando o parâmetro α ao longo do seu processamento.

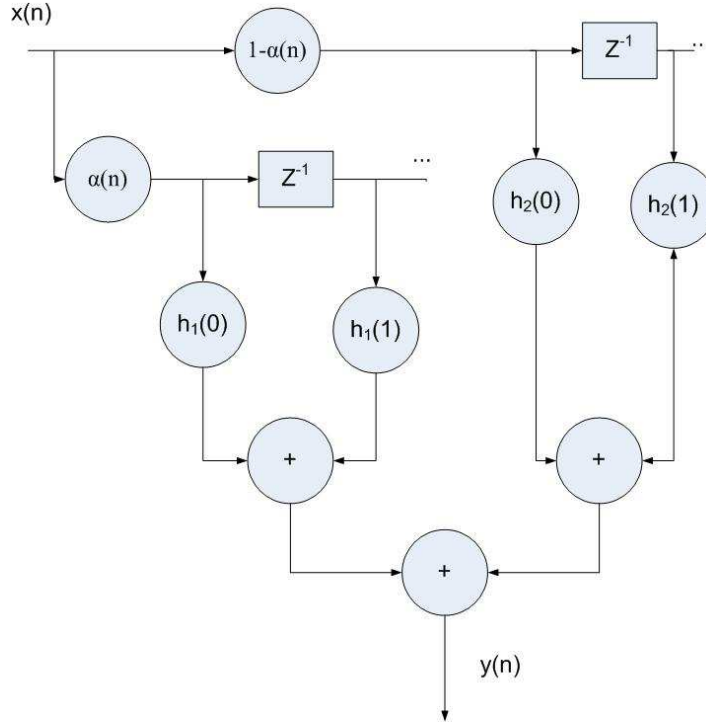


Figura 2.7: Interpolação das respostas do microfone antes da convolução.

Temos as duas respostas consecutivas, $h_1(n)$ e $h_2(n)$. $h_1(n)$ é a resposta anterior, enquanto $h_2(n)$ representa a resposta do microfone na posição actual. N_1 representa o tamanho da resposta do transdutor e N_0 o tamanho de cada bloco.

$$h_1(n) = \{h_1(0), h_1(1), \dots, h_1(N_1 - 1)\} \quad (2.19)$$

$$h_2(n) = \{h_2(0), h_2(1), \dots, h_2(N_1 - 1)\} \quad (2.20)$$

Podemos definir o filtro implementado pela seguinte expressão:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} [\alpha(n)h_1(k) + (1 - \alpha(n))h_2(k)] x(n - k) \quad (2.21)$$

As respostas podem ter o tamanho máximo igual a cada bloco no qual dividimos o sinal áudio - N_0 . Cada amostra do sinal original é multiplicada por $\alpha(n)$ ou $1 - \alpha(n)$, consoante o sinal seja processado com a resposta 1 - $h_1(n)$ - ou com a resposta 2 - $h_2(n)$ - respectivamente. Como ilustra a figura 2.8, $\alpha(n)$ começa com o valor 1 e vai decrescendo até 0 em N_1 amostras. Assim transitamos da primeira resposta do microfone para a segunda.

Enquanto o sinal áudio tem $N_0 = 1024$ amostras, $\alpha(n)$ terá o tamanho que quisermos atribuir à interpolação (relembrando que o valor máximo será sempre o tamanho máximo de cada bloco). Se o tamanho da interpolação for de $N_1 = 100$ amostras, por exemplo, a partir de $n = 100$ $\alpha(n)$ toma o valor zero, consequentemente $1 - \alpha(n) = 1$, assim teremos somente a resposta 2 do microfone.

Na figura 2.7 temos um diagrama onde a resposta do transdutor possui apenas duas amostras. Este diagrama é apenas exemplificativo, podendo e devendo o número de amostras ser superior.

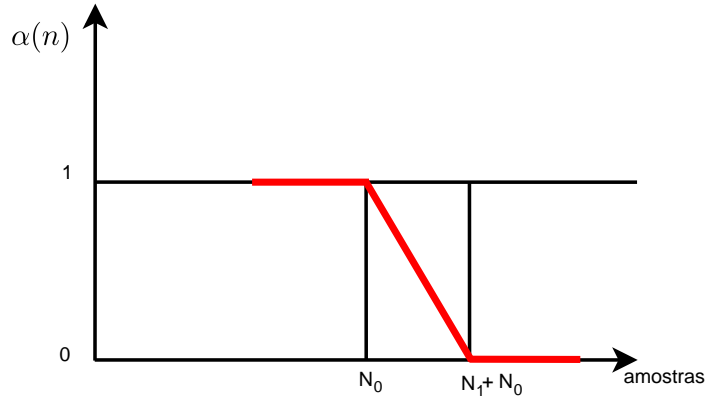


Figura 2.8: Variação da função $\alpha(n)$.

Interpolação após a convolução das respostas do microfone com o sinal áudio.

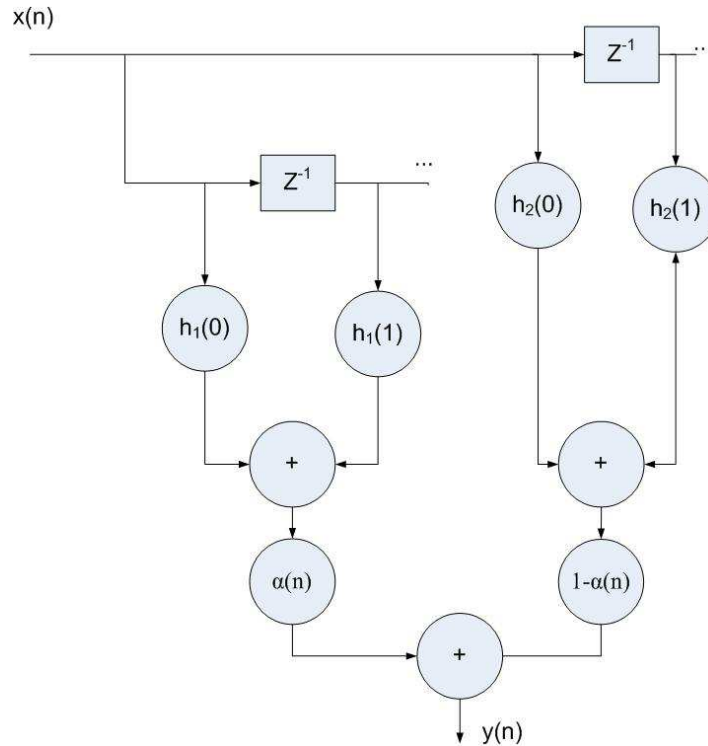


Figura 2.9: Interpolação efectuada após a convolução do sinal com a resposta do microfone.

Por outro lado, a interpolação pode ser efectuada após a convolução dos sinais com as respostas do microfone, como exemplificado na figura 2.9. Neste caso o sinal é processado com as respostas e só depois efectuada a interpolação. Para o bloco actual efectua-se a convolução com a resposta anterior e com a resposta actual, é depois realizada a interpolação para que ocorra a transição da resposta anterior para a resposta presente de forma suave e

imperceptível para o ouvinte, eliminando todos os *clics*.

A expressão que representa o sistema é mesma, equação 2.21, pois matematicamente não existem diferenças nestes dois processos. A escolha de qual o melhor para implementar a aplicação varia com a plataforma usada. No Matlab podemos tirar partido da função *conv.m* já existente e aplicar o segundo método, interpolar apenas depois de efectuadas as duas convoluções. No entanto esta opção é mais dispendiosa ao nível do processamento efectuado pelo computador e torna impossível uma implementação em tempo real.

Estes dois métodos permitem-nos eliminar as perturbações introduzidas pela comutação entre respostas dos transdutores. Um ouvinte é assim abstraído completamente de todo o processo inerente à manipulação que foi realizada no sinal original.

Resultado após interpolação, usando o Matlab.

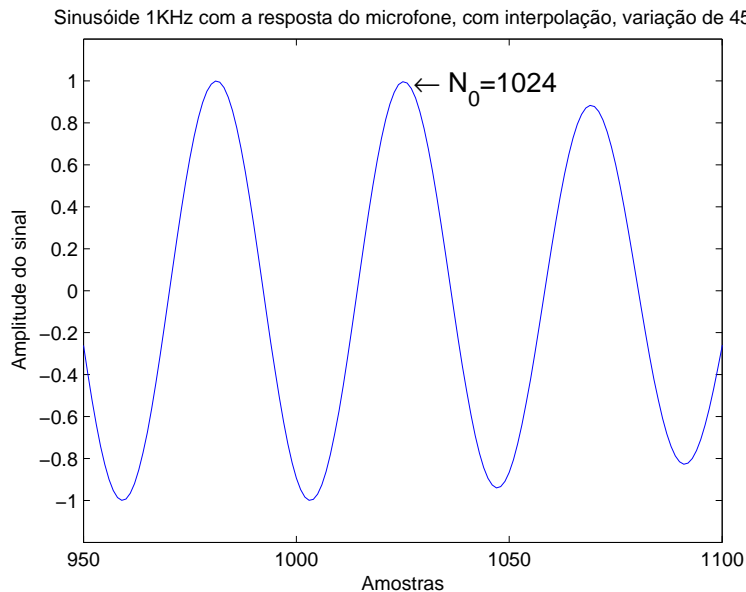


Figura 2.10: Sinal sinusoidal a 1kHz após interpolação.

Na figura 2.10 temos o mesmo sinal da figura 2.6, processado nas mesmas condições, mas com interpolação entre blocos consecutivos. Seria de esperar uma descontinuidade da amostra com o índice 1023 para o 1024, mas como existe uma interpolação a transição entre blocos é suave e imperceptível ao ouvido Humano. Usou-se o método representado pelo diagrama da figura 2.9.

Tanto visualmente como ao nível da audição consegue-se com este método eliminar os *clics* de forma eficaz, e proceder à manipulação de qualquer sinal áudio. Estamos em condições de elaborar uma demonstração, onde seleccionando um percurso pré-definido do microfone podemos ouvir o resultado da sua resposta, para o modelo simulado do pistão.

2.1.5 Demo

Como já foi referido no Matlab não é fácil implementar aplicações em tempo real, contudo podemos delinear um percurso a percorrer pelo microfone, e calcular o resultado final do

processamento da resposta do pistão com um sinal áudio. No *script simVersDemo.m*¹ temos um programa que processa um sinal áudio, uma flauta captada em condições anecóicas, e podemos graficamente visualizar as diferenças entre o sinal original, figura 2.11, e o sinal processado, figura 2.12.

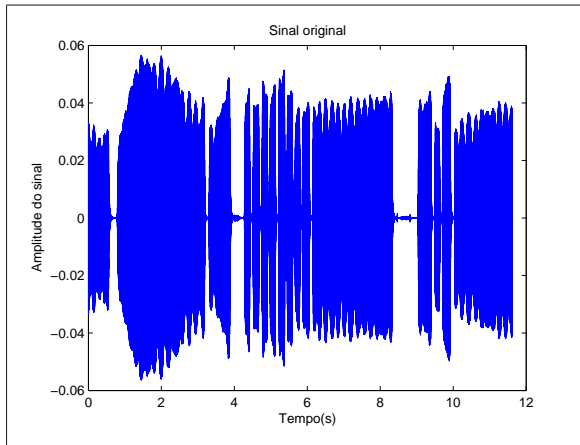


Figura 2.11: Sinal original, flauta tenor captada em condições anecóicas, sem qualquer tipo de processamento.

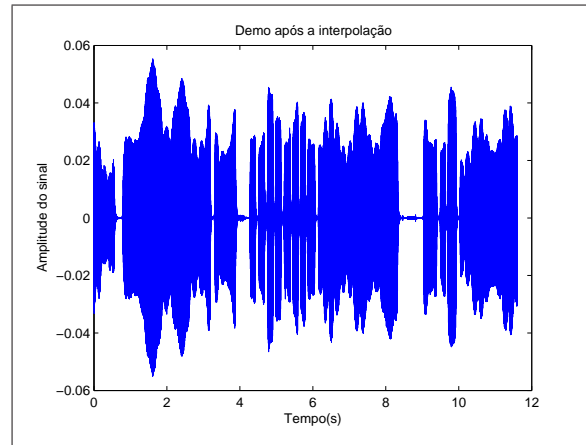


Figura 2.12: Flauta tenor captada em condições anecóicas, processada com as respostas do pistão.

O processamento foi efectuado tendo em conta uma variação constante do microfone entre 0° e 90° , com um incremento de 5° por cada bloco de sinal, 1024 amostras. Ou seja, a cada 1024 amostras o microfone desloca-se 5° ou para a esquerda ou para a direita consoante progrida no sentido de 0° ou de 90° . Para 0° a -90° os resultados serão simétricos, uma vez que o modelo do pistão é simétrico (segue o modelo da função *sinc*). Escolheu-se este incremento mas pode-se optar por um outro valor, bastando para tal apenas alterar a variável *incremento* no referido *script*.

Além das figuras é também gerado um ficheiro *wave* denominado *demo_resp_micro.wav*, cujo o conteúdo é o sinal originado processado com as resposta do pistão. É possível assim analisar auditivamente os resultados.

A principal conclusão que se retira dos resultados auditivos e visuais é a existência de uma diferença em amplitude no sinal, dependendo do ângulo de captação. Assim, frontalmente o sinal sofre pouca ou nenhuma atenuação, enquanto perpendicularmente existe alguma atenuação nas frequências elevadas. Este efeito só não é muito óbvio devido a dois motivos: a interpolação realizada entre blocos dilui as diferenças e o incremento entre respostas não é muito brusco.

Visualmente são notórias as diferenças, a amplitude do sinal original e do processado diferem em determinados pontos.

¹Vide Anexo A

2.2 Caracterização

Na música e no áudio em geral não existe nada utilizável abaixo de 20Hz (infra-som), nem acima de 20kHz (ultra-som). Contudo, provavelmente, um microfone que responde a partir de 10Hz responde com maior facilidade, maior solidez, abaixo de 50Hz do que outro cuja banda de frequência comece somente a partir de 20Hz. O mesmo vale para o limite superior: o microfone que responde até 20kHz provavelmente é mais transparente acima de 16kHz do que outro que apenas responde até 18kHz. As variações da resposta entre 40 e 16kHz são as que definem o timbre de um microfone.

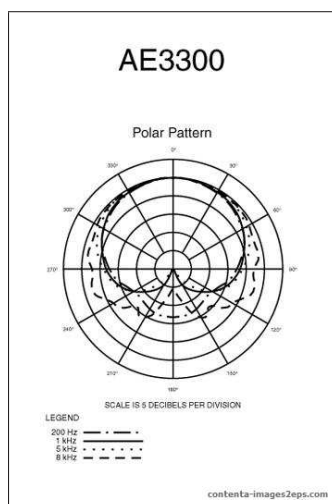


Figura 2.13: Gráfico polar para o microfone AE3300 fornecido pelo fabricante.

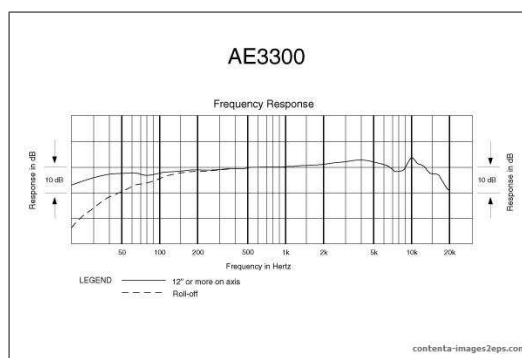


Figura 2.14: Resposta em frequência fornecida pelo fabricante.

Microfones são instrumento musicais, e não simples transdutores de energia. Têm colorações, modificam o som de maneira muitas vezes agradável. Em muitos casos, um microfone com resposta pior (em frequência) é o que soa melhor[1].

Contudo é importante conhecer com exactidão a resposta de um microfone pois tal permite-nos compreender o seu comportamento numa captação. Apesar dos artefactos introduzidos pelo microfone terem a capacidade de por vezes tornar o som agradável tal não é rigoroso. Um técnico de som quer ter completo controlo sobre o que capta e não pode desprezar colorações inerentes ao uso de determinado microfone e que em nada dependem da acústica do local ou do tipo de som a captar. O conhecimento da resposta em frequência é portanto extremamente importante.

Existe uma enorme dificuldade em encontrar junto de vendedores, mesmo os mais conceituados, informação sobre a resposta em frequência dos microfones que vendem. Normalmente a informação encontrada cinge-se à banda de frequência para a resposta axial (muitas vezes de forma superficial e sem o rigor necessário), apresentam um gráfico polar com apenas algumas frequências, no caso estudado da Audio-technica 200Hz, 1kHz, 5kHz e 8kHz. As figuras 2.13 e 2.14 mostram a informação usual num *datasheet* do fabricante, neste caso para o microfone AE3300 [2].

Algo que todos os fabricantes desprezam e não conseguimos encontrar em qualquer *datasheet* de um microfone é a influência do ângulo de captação conjugado com a frequência

AE3300 SPECIFICATIONS*	
ELEMENT	Fixed-charge back plate permanently polarized condenser
POLAR PATTERN	Cardioid
FREQUENCY RESPONSE	30-18,000 Hz
LOW FREQUENCY ROLL-OFF	80 Hz, 12 dB/octave
OPEN CIRCUIT SENSITIVITY	-42 dB (7.9 mV) re 1V at 1 Pa*
IMPEDANCE	150 ohms
MAXIMUM INPUT SOUND LEVEL	147 dB SPL, 1 kHz at 1% T.H.D.; 157 dB SPL, with 10 dB pad (nominal)
NOISE ¹	19 dB SPL
DYNAMIC RANGE (typical)	128 dB, 1 kHz at Max SPL
SIGNAL-TO-NOISE RATIO ¹	75 dB, 1 kHz at 1 Pa*
PHANTOM POWER REQUIREMENTS	11-52V DC, 3 mA typical
SWITCHES	High-pass filter; 10 dB pad (nominal)
WEIGHT (less accessories)	10.6 oz (300 g)
DIMENSIONS	7.05" (179.0 mm) long, 1.97" (50.0 mm) head diameter, 1.30" to 0.87" (33.0 mm to 22.0 mm) tapered body diameter
OUTPUT CONNECTOR	Integral 3-pin XLRM-type
ACCESSORIES FURNISHED	AT8470 Quiet-Flex™ stand clamp for 5/8"-27 threaded stands; soft protective pouch

Figura 2.15: Dados fornecidos pela Audio-Technica no *datasheet* do microfone AE3300.

captada. São dados alguns gráficos polares como na figura 2.13, mas estes apenas mostram algumas frequências.

Na figura 2.15 temos os dados típicos fornecidos por um fabricante. Além dos diagramas e gráficos já referidos é usual encontrar uma tabela muito similar à apresentada. Informam características como diagrama de radiação, *noise*, dimensões, SNR, impedância, se requer ou não *phantom power* e qual o seu intervalo de resposta em frequência. São também características importantes, mas o nosso interesse consiste na obtenção rigorosa da resposta em frequência de microfones.

2.3 Tipos de transdutores

O microfone é um transdutor que transforma um sinal físico (ondas sonoras) num sinal eléctrico. A maioria dos microfones possui um diafragma fino e flexível que converte as ondas sonoras em vibrações mecânicas, sendo estas depois transformadas num sinal eléctrico através ou de uma bobina móvel ou por carga e descarga de um condensador.

Em 1876, Alexander Graham Bell descreveu o seu primeiro telefone com um microfone por indução magnética para converter o sinal de entrada - voz, num sinal eléctrico. O princípio fundamental levou a uma variedade de modelos otimizados para diferentes necessidades, desde aplicações para utilizadores com deficiências auditivas aos cantores ou apresentadores de programas televisivos, gravações musicais, comunicações, etc.

Existem diferentes tipos de microfone, tendo em conta o princípio físico para transdução. Podem diferir no material pelo qual são constituídos, no princípio de operação mas possuem

uma finalidade comum: a captação de som.

Alguns dos tipos de microfones mais comuns são:

- dinâmico
- condensador
- fita
- carbono
- piezoelétrico
- laser

Ao seleccionar um microfone para uso ao vivo ou num estúdio de gravação geralmente existem dois tipos diferentes: dinâmico e condensador. São estes os mais usados e os mais comercializados (cerca de 95%) [17].

2.3.1 Microfone dinâmico

De forma geral, os microfones dinâmicos podem ser considerados similares a altifalantes convencionais. Ambos têm um diafragma (ou cone) com uma bobina (uma bobina longa, de fio) presa próximo aos extremos. Têm um sistema magnético com a bobina no meio, a diferença está em como são utilizados.

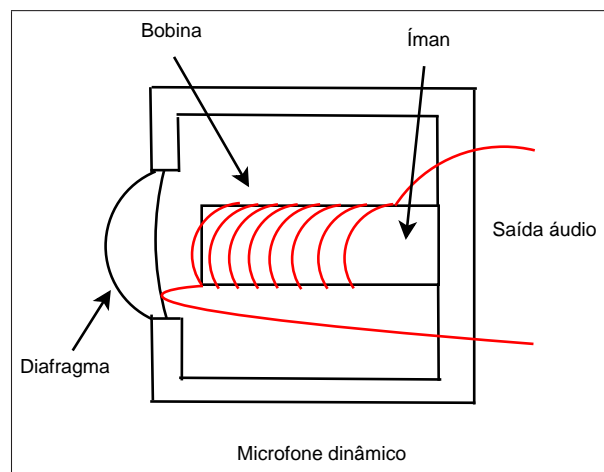


Figura 2.16: Esquema de funcionamento de um microfone dinâmico.

Num altifalante, a corrente do amplificador flui através da bobina. O campo magnético criado pela corrente que flui através da bobina interage com o campo magnético do íman do altifalante, forçando um movimento para dentro e para fora da bobina com o cone afixado, o que produz a saída do som. Um microfone dinâmico opera como um altifalante “ao contrário”. O diafragma é movimentado pela alteração da pressão sonora. Isto move a bobina, o que provoca um fluxo de corrente quando as linhas de fluxo do íman são cortadas. Desta forma, em vez da aplicação de energia eléctrica à bobina (como num altifalante), obtém-se saída de energia, a figura 2.16 ilustra como opera um microfone dinâmico. Na verdade, muitos sistemas

de comunicação utilizam pequenos altifalantes com cones leves como microfone e altifalante, simplesmente comutando o mesmo transdutor de uma das extremidades do amplificador para a outra [3].

Vantagens e limitações

Os microfones dinâmicos são famosos pela sua resistência e confiabilidade. Não precisam de baterias ou fontes de alimentação externas. São capazes de produzir uma resposta plana numa ampla gama de frequências ou estão disponíveis com respostas “sob medida” para aplicações especiais. Ao nível da saída é suficientemente elevado para conexão directa à maioria das entradas de microfone, com uma excelente relação sinal-ruído. Exigem pouca ou nenhuma manutenção regular e, com cuidados razoáveis, manterão o mesmo desempenho por muitos anos [26].

2.3.2 Microfone de condensador

O microfone de condensadores é o tipo mais comum de microfone que se encontra nos estúdios. Estes têm uma resposta em frequência muito maior do que os dinâmicos e uma boa resposta transitória. Devido à sua sensibilidade a sons intensos, e também o facto destes microfones serem um pouco mais frágeis do que os dinâmicos leva a que sejam geralmente utilizados em estúdios de gravação e ambientes similares.

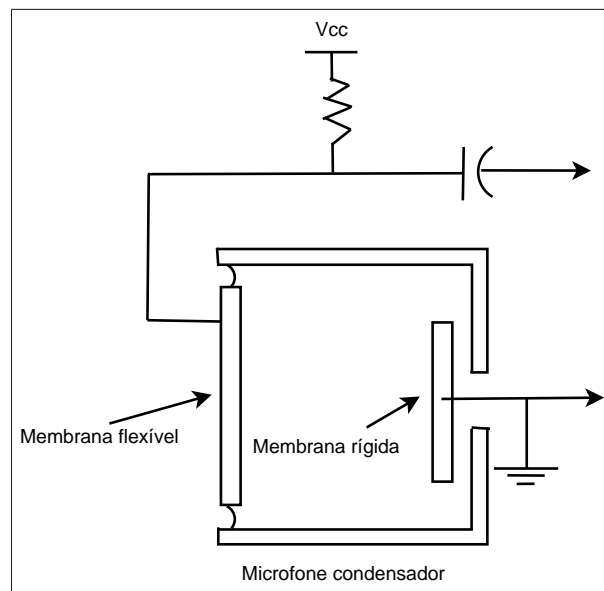


Figura 2.17: Esquema exemplificativo do funcionamento de um microfone de condensador.

Os microfones condensadores utilizam uma membrana leve e uma placa fixa que actuam como faces opostas de um condensador. A pressão sonora contra essa fina película de polímero faz com que ela se mova. Esse movimento altera a capacidade do circuito e cria uma saída eléctrica variável, na figura 2.17 temos um esquema exemplificativo do funcionamento destes microfones. Em muitos aspectos, o microfone condensador funciona da mesma maneira que um altifalante de agudos (vulgarmente denominado “tweeter”) electrostático, embora a uma escala muito menor e ao *contrário*.

Os microfones condensadores são preferidos por causa da sua resposta em frequência muito uniforme e a capacidade para responder com clareza a sons transientes. A baixa massa da membrana do diafragma permite uma ampla gama de resposta em altas frequências, enquanto que a natureza dessa mesma membrana também assegura a captação das baixas frequências. O som resultante é natural, limpo e claro, com excelente transparência e rico em detalhes. Actualmente existem à disposição dois tipos básicos de microfones condensadores, condensador e electreto. Condensador utiliza uma fonte de alimentação externa para fornecer a tensão de polarização necessária ao circuito capacitivo. Esses microfones com polarização externa destinam-se principalmente à utilização em estúdios profissionais ou outras aplicações extremamente críticas [12].

Um desenvolvimento mais recente é o microfone de condensador com electreto. Este microfone funciona com uma tensão de polarização inferior (apenas 2-3V) à presente nos típicos microfones de condensador, apenas para alimentar um transístor interno, que consome aproximadamente 1mA. O princípio de operação é semelhante ao microfone de condensador mas para o microfone de electreto o movimento da membrana altera a indução eléctrica, que está ligada à *gate* de um transístor FET (*Field Effect Transistor*). Este transístor amplifica o sinal eléctrico, saindo no seu *dreno* o sinal que posteriormente será enviado para a placa de som. Actualmente existem circuitos bastante sofisticados neste tipo de microfone, possuindo, por exemplo, pré-amplificadores de elevada performance [7].

Os melhores microfones condensadores com electreto são capazes de desempenhos de qualidade muito elevada, e são amplamente utilizados em *broadcast*, gravação e reforço de som [3].

Vantagens e limitações

Os elementos condensadores apresentam outras vantagens de projecto que os tornam a escolha ideal (ou a única) para muitas aplicações: pesam muito menos do que os elementos dinâmicos e podem ser muito menores. Essas características tornam-nos a escolha lógica para os microfones de linha (*shotgun*), microfones de lapela e microfones miniatura de todos os tipos. As tentativas para miniaturizar microfones dinâmicos resultaram em respostas de níveis muito baixos para baixas frequências, perda global em termos de sensibilidade acústica e maior ruído de ordem mecânica ou por movimento. Uma limitação clara e objectiva dos microfones condensadores é a necessidade de *phantom power* [3].

Outros tipos de microfones

Há diversas maneiras de transformar som em energia eléctrica. Grãos de carbono também são utilizados como elementos de microfones de telefone e de comunicação. Alguns microfones de baixo custo utilizam elementos de cristal ou de cerâmica que geralmente são suficientemente bons para voz, mas não para reprodução de música ou sons críticos (sons ricos em detalhe, variedade e multiplicidade de fontes sonoras).

Um outro tipo algumas vezes encontrado em estúdios de gravação é o microfone de fita. É uma forma de microfone dinâmico, com uma fina fita metálica (que actua como bobina e diafragma) suspensa entre os pólos de um circuito magnético. Embora seja capaz de um excelente desempenho, o elemento de fita precisa estar protegido contra elevados níveis de pressão acústica ou vento, pois é relativamente frágil. Por essa razão, estes microfones são raramente utilizados em aplicações de reforço de som ou gravação fora de estúdio. Os microfones de fita

são muitas vezes projectados para responder a sons frontais e posteriores e, algumas vezes, são utilizados quando é necessário um padrão de captação bidireccional.

2.4 Resposta direccional

A resposta direccional ou padrão de radiação de um microfone é ilustrado num gráfico polar, onde a sensibilidade varia com o ângulo de captação (θ, ϕ) . Consoante o padrão de radiação do diagrama polar os microfones podem ser classificados segundo: omnidireccional, cardióide, hipercardióide e figura de 8. Muitos microfones são concebidos para exibir um destes diagramas de radiação, mas é comum encontrar modelos que possuem outros padrões para aplicações muito específicas.

2.4.1 Omnidireccional

Os microfones omnidireccionais exibem um padrão de radiação mais ou menos circular. A figura 2.18 apresenta um gráfico polar típico de um microfone omnidireccional, i.e. estes microfones são igualmente sensíveis na direcção axial ($\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$) e afastados deste posicionamento ($\theta = 0^\circ, \phi \neq 0^\circ$).

Idealmente estes microfones respondem igualmente, qualquer que seja a direcção de onde provém o som. Os microfones de condensador e dinâmicos mais simples apresentam esta resposta direccional.

Frequências incidentes cujos comprimentos de onda são mais curtos do que a cápsula não podem ser difractados em volta do microfone, o que limita a capacidade do diafragma responder a estes. Assim a resposta destes microfones perde omnidireccionalidade para as frequências mais elevadas do som captado.

Como a sua resposta em frequência é bastante suave são muito usados para captação de voz, tanto em sistemas de sonorização como em estúdios de gravação. O ruído de manuseamento que apresentam é relativamente baixo e por possuírem geralmente diafragmas bem amortecidos são mais robustos do que os cardióides.

Contudo, estes microfones não são adequados para captar um determinado som em particular, proveniente de uma direcção específica, pois captam todo o meio de igual forma. São óptimos para captar o som proveniente de uma fonte em movimento. O formato de captação omnidireccional é encontrado em microfones de lapela, muito utilizados para captação de oradores, pois mesmo com a mudança de lugar da fonte (quando o orador vira a cabeça) a resposta do microfone continua a mesma [18] [15].

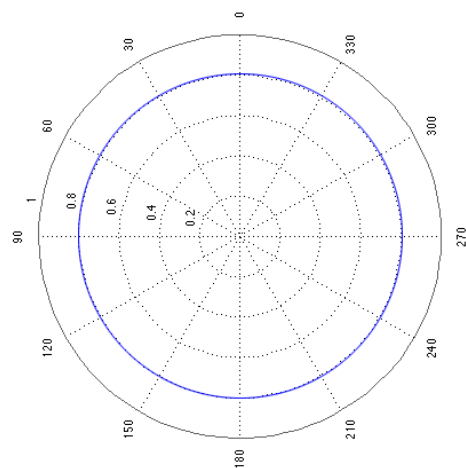


Figura 2.18: Diagrama omnidireccional.

2.4.2 Cardióide

O microfone cardióide, como o nome indica, apresenta um diagrama de radiação em forma de coração. São mais sensíveis no seu posicionamento axial em relação à fonte sonora

e em ângulos circundantes, e menos sensíveis para ângulos afastados desta posição, sendo idealmente insensíveis para $\phi = 180^\circ$.

A figura 2.19 apresenta o gráfico polar de um microfone cardióide. Captam melhor o som que lhe chega na sua frente e conforme nos afastamos desse ponto a sua captação é reduzida, sendo os sons provenientes de parte de trás captados com muito pouca intensidade. Comparativamente este tipo de microfone possui um alcance maior do que um omnidireccional conseguindo manter uma melhor performance em relação ao ruído aleatório do ambiente.

São usados em situações em que é importante captar o som de um ponto específico, e simultaneamente queremos atenuar o ambiente circundante, sobretudo proveniente da retaguarda do microfone, como o ruído proveniente da audiência num concerto. Estes microfones são muitas vezes usados para gravação de voz, porque tendem a não apresentar um *efeito de proximidade*, presente noutros microfones, que leva a um “*boominess*” artificial nas baixas frequências (amplificação dos graves), quando colocados muito próximos da fonte.

A sua utilização é indicada para lugares ruidosos ou para evitar a reverberação em ambientes fechados. Também quando queremos um controlo da directividade, que é o caso de quando temos vários instrumentos num determinado ambiente e queremos captar um a um individualmente [18] [15].

2.4.3 Hipercardióide

Os microfones hipercardióides são semelhantes aos cardióides no seu diagrama de radiação, mas apresentam os seus nulos a sensivelmente $220^\circ/230^\circ$ e a $130^\circ/140^\circ$, possuindo um pequeno lóbulo fora de eixo, 180° . Assim respondem perfeitamente para $\phi = 0^\circ$, e a ângulos vizinhos, e um pouco também afastado do eixo, a $\phi = 180^\circ$. A figura 2.20 ilustra o diagrama de radiação característico de um microfone hipercardióide.

Quando queremos captar várias fontes sonoras muito próximas umas das outras o microfone hipercardióide é uma boa solução, pois o seu ângulo de captação mais estreito que o cardióide evita que uma fonte gere muita interferência sobre a outra, com isso temos os sons de cada fonte captados com maior limpidez. São usados em aplicações semelhantes aos cardióides, mas onde é necessário também captar algum som fora de eixo, e eliminar/atenuar o que provém das

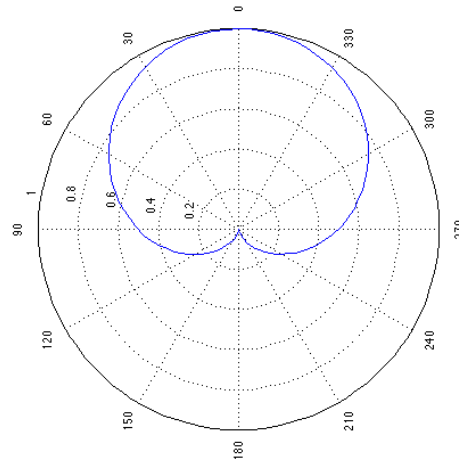


Figura 2.19: Diagrama cardióide.

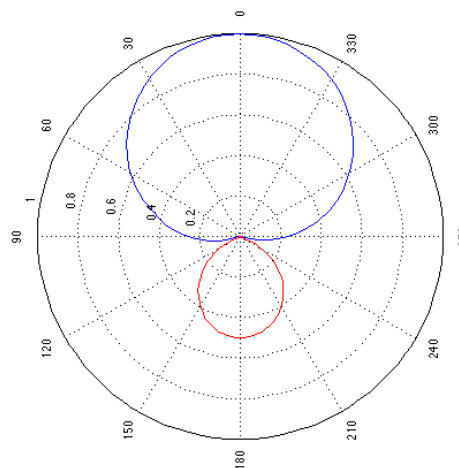


Figura 2.20: Diagrama hipercardióide.

laterais [18] [15].

2.4.4 Figura de 8

Finalmente, os microfones figura de 8 (também denominados microfones bidireccionais) são desenhados para responder com idêntica sensibilidade no plano frontal e da retaguarda do microfone, e para possuir nulos a 90° e a 270° . Estes microfones são particularmente susceptíveis ao *efeito de proximidade* e ao vento, o seu uso fica assim limitado a estúdios de gravação e aplicações similares.

A forma mais simples dos microfones de fita possui este tipo de resposta, respondendo à diferença de pressão sobre as duas faces de uma folha.

São muito úteis para gravação onde os intervenientes se encontram face-a-face como pares de instrumentos colocados frente a frente e entrevistas [18] [15].

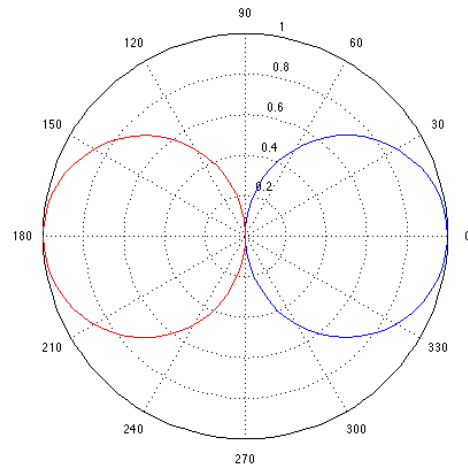


Figura 2.21: Diagrama figura de 8.

2.5 Microfones de medição

Um microfone de medição é um microfone calibrado, projectado para o uso com sistemas de som que quantificam, por exemplo, o nível do som ou mesmos medir outros microfones. São os mais precisos e os microfones de maior confiança disponíveis.

Evidentemente, o alto desempenho desses microfones exige elevados padrões de engenharia. As especificações dos microfones de medição são diferentes dos restantes, mas, apesar de tudo, não é possível obter o microfone perfeito. Os microfones de medição são calibrados para que as suas características sejam bem definidas e para que os seus comportamentos sejam previsíveis.

Podemos dividir a calibração de microfones em dois grandes tipos: calibração primária e secundária. Os métodos usados pela calibração denominada primária são muito demorados e demasiado dispendiosos, estando por isso só ao alcance das grandes empresas fabricantes de microfones. A calibração secundária é muito menos dispendiosa e geralmente proporciona resultados não tão bons, mas mesmo assim suficientemente precisos para quem pretende um razoável microfone de medição. Dois métodos de calibração considerados secundários são: actuador electrostático e a comparação de microfones [22].

O actuador electrostático é um método não acústico, cujo o equipamento é um pouco dispendioso mas os resultados podem ser excelentes. Neste método remove-se a grelha protectora do microfone e esta é substituída por actuador electrostático. Colocando o microfone com esta adaptação numa caixa isolada eliminamos qualquer ruído ambiente que possa interferir na medição. O actuador não produz uma onda sonora, por isso se diz que este método não é acústico, o diafragma do actuador une-se com o diafragma do microfone electrostaticamente. A energia é transferida através do campo eletrostático e o microfone *pensa* que está sob um campo sonoro. Faz sentido falar neste método pois muitos fabricantes usam-no para calibrar os chamados microfones de referência que são usados no método de comparação.

O método de comparação, como o próprio nome indica, é realizado através da comparação do microfone a ser calibrado/medido com um microfone de referência. Tal como é referido em [22] existe a necessidade de um altifalante com uma resposta plana, ou muito próxima, para que se consigam obter resultados válidos.

Com um equipamento vulgarmente existente num laboratório de áudio conseguimos montar um sistema de medição pelo método de comparação de microfones. Deste equipamento fazem parte um microfone de referência (por exemplo o *Behringer ECM8000*, que é um microfone bastante barato e de resposta muito plana, sendo por isso um microfone muito interessante para usar como referência), uma coluna, uma placa de som, um amplificador e cabos. O procedimento pode resumir-se:

1. Manter o ambiente de medição o mais silencioso possível.
2. Ligar todos os equipamentos, e usar um software de medição de resposta como por exemplo o *TrueRTA*.
3. Colocar o microfone de referência no suporte, reproduzir um sinal de teste como por exemplo um varrimento em frequência. Observar e guardar a resposta em frequência medida.
4. Substituir o microfone de referência pelo microfone a ser calibrado. Medir também a resposta deste.
5. Compensar a resposta do microfone a calibrar à resposta do microfone calibrado.
6. Usar essa diferença para o processamento de medições efectuadas com o microfone a calibrar, de forma a corrigir os seus defeitos.

Estes tópicos enumeram de uma forma muito abreviada a maneira como são medidos microfones com recurso ao método de comparação. Elaborando funções de medição de resposta e usando o método de comparação podemos medir microfones de forma razoavelmente rigorosa sem equipamentos muito dispendiosos. No próximo capítulo vamos explicar a metodologia seguida para conseguir medir microfones.

Capítulo 3

Resposta impulsional e sua medição

3.1 Sistemas lineares e invariantes no tempo (LTI)

3.1.1 Noção de sistema

Em Engenharia, dá-se o nome de sistema a algo que executa uma operação ou transformação sobre um sinal de entrada produzindo um sinal de saída [14]. Usaremos t para representar a variável *tempo*. Seja, então, $y(t)$ a resposta de um sistema H a um sinal de entrada $x(t)$, como mostra o diagrama de blocos da figura 3.1.

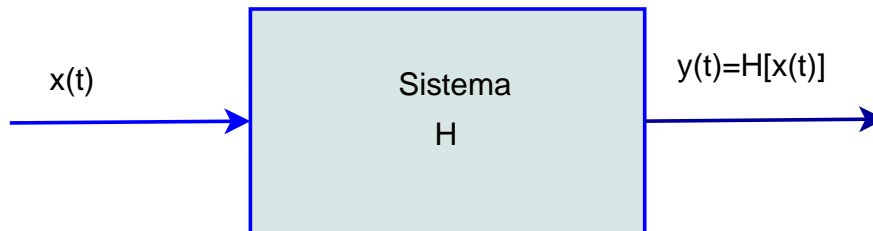


Figura 3.1: Sistema genérico no domínio do tempo.

3.1.2 Linearidade

Se se verificarem as seguintes condições

$$H(x) = y \Rightarrow H(\alpha x) = \alpha y \quad (\textit{Homogeneidade}) \quad (3.1)$$

$$H(x_1 + x_2) = H(x_1) + H(x_2) \quad (\textit{Aditividade}) \quad (3.2)$$

então o sistema diz-se linear.

Estas duas condições podem resumir-se numa única equação:

$$H[\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)] = \alpha H[x_1(t)] + \beta H[x_2(t)] \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R} \quad (\textit{Linearidade}) \quad (3.3)$$

3.1.3 Invariância temporal

Diz-se que um sistema é invariante no tempo se a um deslocamento temporal na sua entrada corresponder igual deslocamento na sua saída. Nestas condições, em referência à figura 3.1, verifica-se:

$$H[x(t - \tau)] = y(t - \tau) \quad \forall \tau \in \mathbb{R} \quad (3.4)$$

3.1.4 Resposta Impulsional de um Sistema LTI

Os sistemas simultaneamente lineares e invariantes no tempo (*Linear, Time Invariant - LTI*) formam uma importante categoria, por serem completamente caracterizados pela sua resposta ao impulso de *Dirac*, também designada resposta impulsional (*Impulse Response - IR*) - $h(t)$ em tempo contínuo ou $h[n]$ em tempo discreto. De facto, dada a *IR* de um sistema *LTI*, é possível obter a sua saída, para qualquer sinal de entrada, através duma operação designada *convolução*, que representaremos pelo símbolo $*$ e se define, em tempo contínuo, pelo seguinte integral (integral de convolução):

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau = h(t) * x(t) \quad (3.5)$$

Analogamente, em tempo discreto teremos o seguinte somatório (somatório de convolução):

$$y[n] = \sum_{k=0}^N h[k]x[n - k] = h[n] * x[n] \quad (3.6)$$

3.2 Medição da resposta impulsional de Sistemas LTI

3.2.1 Método da correlação

Actualmente, o método preferido para medição de respostas impulsionalis em sistemas acústicos e de áudio é indiscutivelmente o método da correlação [11]. Este método, ilustrado na figura 3.2, baseia-se no seguinte princípio: se o sinal de entrada do sistema tiver autocorrelação próxima de um impulso, a sua correlação com o sinal de saída aproxima a resposta impulsional do sistema em análise. Segue-se a demonstração matemática [13].

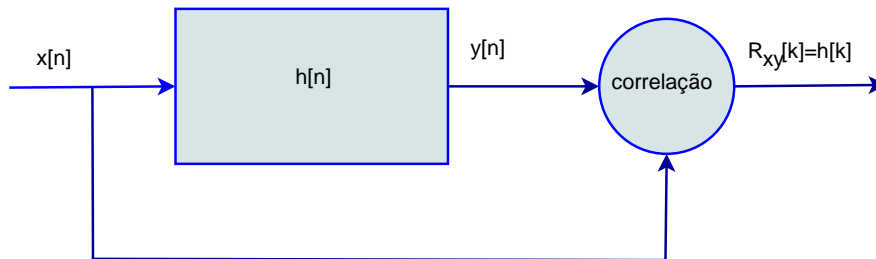


Figura 3.2: Método da correlação para obtenção da resposta impulsional.

A correlação (que denotaremos pelo símbolo \otimes) entre os sinais de entrada e saída é dada pela equação 3.7:

$$x[n] \otimes y[n] = R_{xy}(k) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]y[n+k] \quad (3.7)$$

O sinal de saída y resulta da convolução entre o sinal de entrada x e a resposta do sistema h . Considerando que esta tem N amostras, vem:

$$\begin{aligned} R_{xy}(k) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] \left(\sum_{i=0}^{N-1} h[i]x[n+k-i] \right) = \sum_{i=0}^{N-1} h[i] \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]x[n+k-i] \right) = \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} h[i]R_{xx}[k-i] \end{aligned} \quad (3.8)$$

Como se parte do pressuposto de que a autocorrelação do sinal de entrada pode ser aproximada a um impulso, pode escrever-se:

$$R_{xx}[k-i] \cong \delta[k-i] \quad (3.9)$$

onde $\delta[n]$ representa o impulso unitário, o que implica:

$$\delta[k-i] = \begin{cases} 1, & k=i \\ 0, & k \neq i \end{cases} \quad (3.10)$$

Assim,

$$R_{xy}[k] = \sum_{i=0}^{N-1} h[i]\delta[k-i] \cong h[k] \quad (3.11)$$

Conclui-se que a correlação entre a entrada e a saída aproxima a resposta impulsional do sistema, como se pretendia demonstrar [10].

3.2.2 Sinais de teste. Uso de *chirps* logarítmicos

Existe uma grande variedade de sinais de teste que obedecem à condição exigida pelo método da correlação (possuir autocorrelação unitária), tais como ruído branco, *chirps* lineares, sequências pseudo-aleatórias (MLS), etc. Existe, todavia, amplo consenso em torno da técnica proposta por Ângelo Farina, baseada em sinais de teste *quasi*-sinusoidais, com varimento exponencial do domínio da frequência (*exponential sine-sweep*), também conhecidos como *chirps* logarítmicos [11].

Um *chirp* logarítmico pode ser representado pela expressão seguinte, onde as frequências inicial (f_0) e final (f_1) são escolhidas tendo em conta a gama de interesse:

$$x(t) = \sin \left[\frac{2\pi f_0 T_{final}}{\ln \left(\frac{f_1}{f_0} \right)} \left(e^{\frac{t}{T_{final}} \ln \left(\frac{f_1}{f_0} \right)} - 1 \right) \right] \quad (3.12)$$

Trata-se, à primeira vista, de um sinal de teste desadequado ao método da correlação, pois a sua autocorrelação possui espectro rosa (com amplitude decrescente, i.e. deficitário nas altas frequências). Farina resolve este aparente inconveniente com o uso de um filtro, dito ‘filtro inverso’, que inverte o *chirp* logarítmico ao longo do eixo temporal e atenua a sua

amplitude segundo uma lei logarítmica, desde $0dB$ até $-6\log_2(\frac{f_1}{f_0})dB$. É assim compensada a diferença de energia entre altas e baixas.

A figura 3.3 resume a técnica de medição de resposta impulsional que acaba de ser descrita [11].

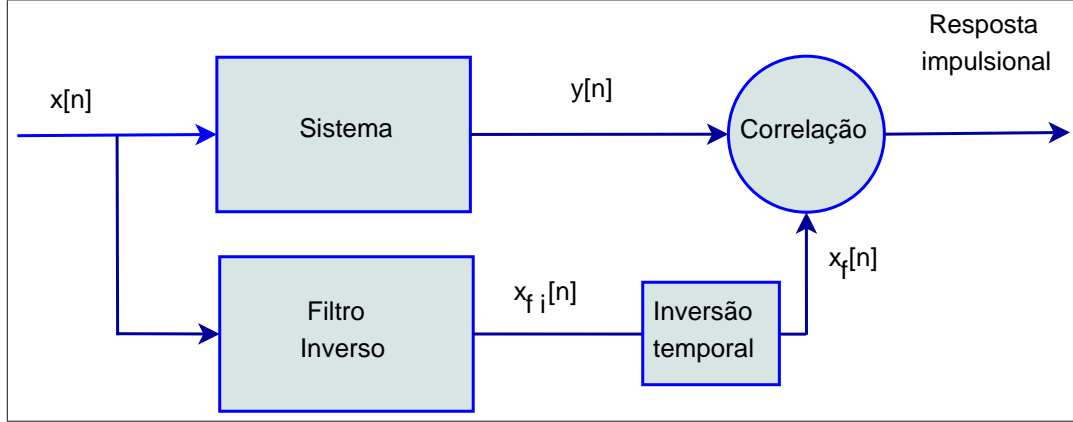


Figura 3.3: Diagrama geral do sistema de medição com aplicação do filtro inverso.

A convolução do *chirp* original, $x[n]$, com o sinal resultante, $x_{fi}[n]$ (ou, alternativamente, a sua correlação com $x_f[n]$, uma vez que a correlação é equivalente à convolução com um dos sinais invertido no tempo [13]) aproxima o impulso de Dirac, $\delta[n]$:

$$x[n] * x_{fi}[n] = x[n] \otimes x_f[n] = \delta[n] \quad (3.13)$$

Uma importante vantagem desta técnica é a baixa susceptibilidade à variância temporal¹. Esta característica deve-se, por um lado, à circunstância de os *chirps* serem particularmente robustos neste aspecto (em comparação, nomeadamente, com os sinais MLS). Por outro lado, deve-se também ao facto deste método necessitar de apenas uma medição para obter a resposta impulsional, ao contrário de outras técnicas que oferecem à partida uma pior relação sinal/ruído e por isso exigem que se realize a média de medições consecutivas [21].

3.2.3 Implementação da técnica de Farina

Implementaram-se em Matlab os *scripts* necessários para realizar um sistema de medição de IR de acordo com o método descrito no ponto anterior e ilustrado na figura 3.3.

Realizou-se um teste muito simples (vide ficheiro *testechirp.m* no Anexo A) para verificar que um *chirp* logarítmico ($x[n]$) correlacionado com o mesmo *chirp* logarítmico processado de acordo com a figura 3.3 ($x_f[n]$) resulta de facto numa aproximação ao impulso de *Dirac* (note-se que esta situação corresponde à medição de um sistema de resposta unitária).

A figura 3.4 mostra o *chirp* logarítmico, $x[n]$ (gerado pela função *logchirp.m*). O filtro inverso é implementado pelo *script* *filt_inv.m*. A figura 3.5 ilustra o *chirp* logarítmico processado, $x_f[n]$.

¹Em sistemas acústicos, a variância temporal pode ser causada, por exemplo, por variações nas condições ambientais climáticas (e.g. temperatura, humidade) ou ajustes na cadeia de medida (e.g. volume, equalização)

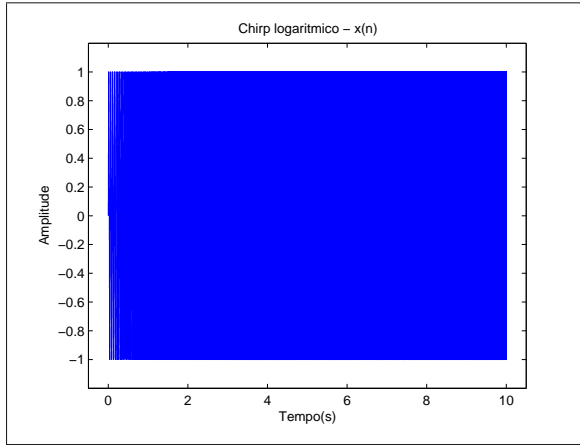


Figura 3.4: Chirp logarítmico (20Hz-20kHz).

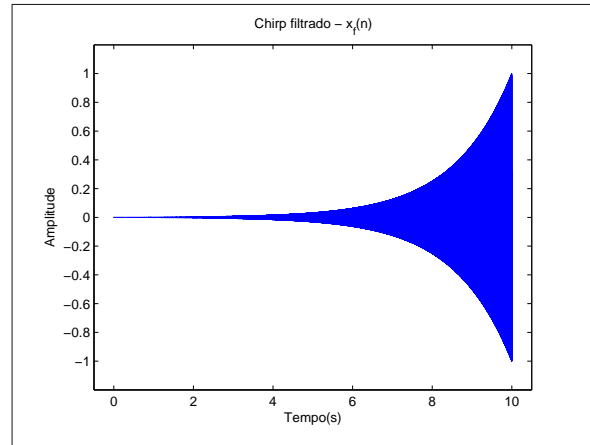


Figura 3.5: Chirp logarítmico filtrado.

Como esperado, a correlação dos sinais das figuras 3.4 e 3.5, apresentada na figura 3.6, é muito próxima do impulso de Dirac.

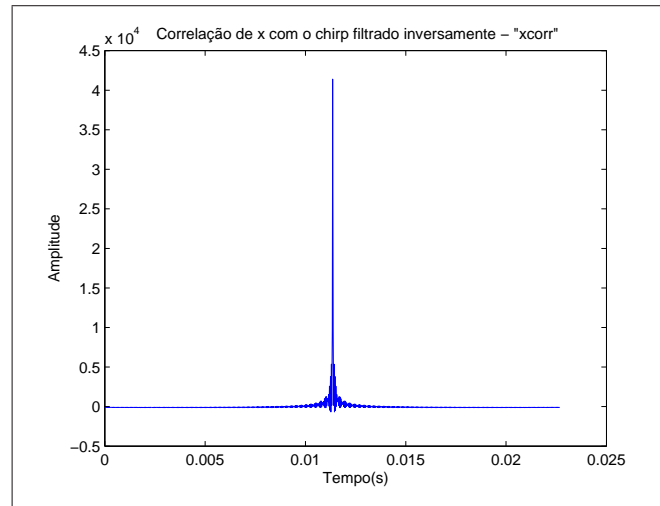


Figura 3.6: Correlação entre $x[n]$ e $x_f[n]$ calculada com a função *xcorr.m* do Matlab.

A figura 3.7 confirma que o espectro do sinal obtido é aproximadamente plano na gama de interesse (20Hz a 20kHz), deixando de apresentar a coloração rosa que se observaria se não fosse aplicada a correcção por filtro inverso.

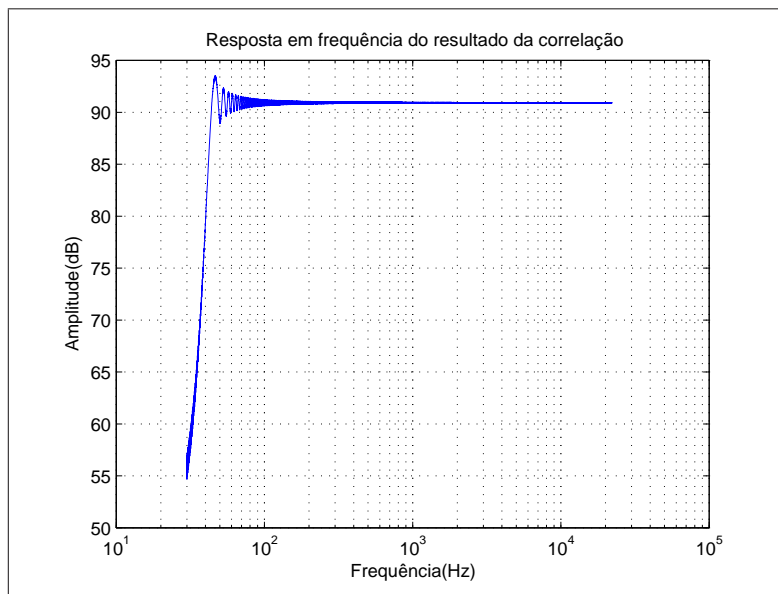


Figura 3.7: Resposta em frequência do resultado da correlação.

3.3 Resposta impulsional de uma cadeia áudio

O quadro de referência do trabalho que pretendemos efectuar é sumariado na figura 3.8. O microfone insere-se invariavelmente numa cadeia áudio envolvendo:

- Uma fonte sonora - esta pode ser natural (e.g. instrumento musical tocado ‘ao vivo’ ou uma reprodução por altifalante; neste caso, está implícita a influência de equipamento a montante (e.g. giradiscos - amplificador).
- Um ambiente acústico (e.g. auditório, sala de aula, igreja, ou mesmo ambiente exterior, como um estádio) - chamemos-lhe ‘sala’, em sentido lato.
- Equipamento de reprodução/gravação a jusante (e.g. pré-amplificador e auscultadores ou conversor A/D e gravador digital...).

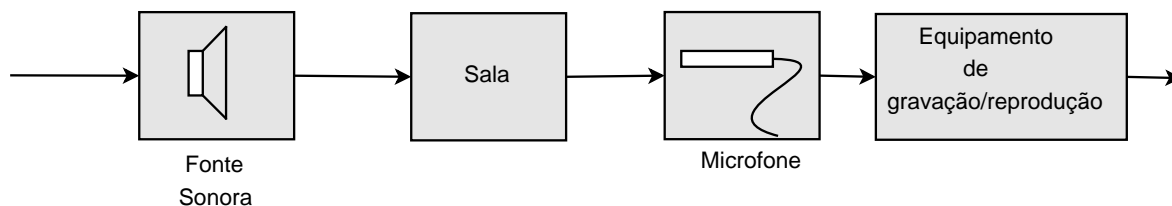


Figura 3.8: Cadeia áudio.

Os ensaios de microfones levados a cabo neste trabalho (detalhados no capítulo seguinte) utilizam a montagem representada nas figuras 3.9 e 3.10.

No diagrama de blocos da figura 3.10, $h_a[n]$, $h_c[n]$, $h_s[n]$ e $h_m[n]$ representam as respostas impulsionais dos elementos analógicos da cadeia áudio, respectivamente amplificador, coluna

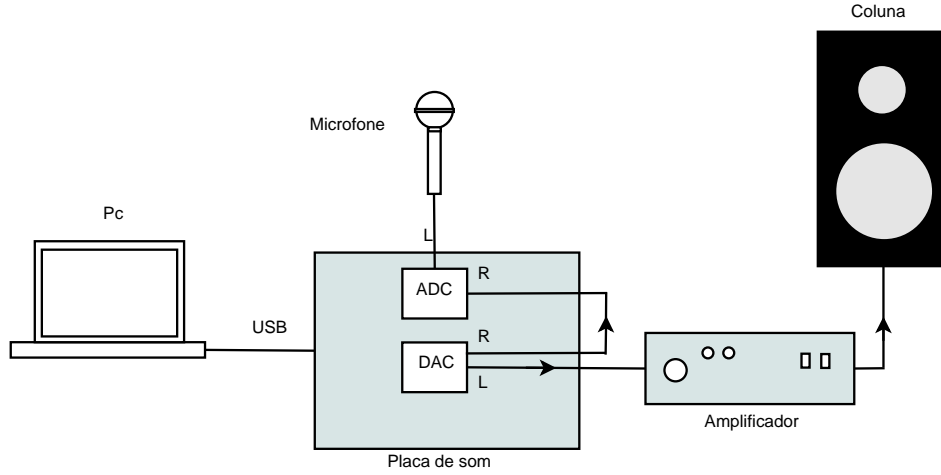


Figura 3.9: Esquema da montagem para medição da resposta de microfones.

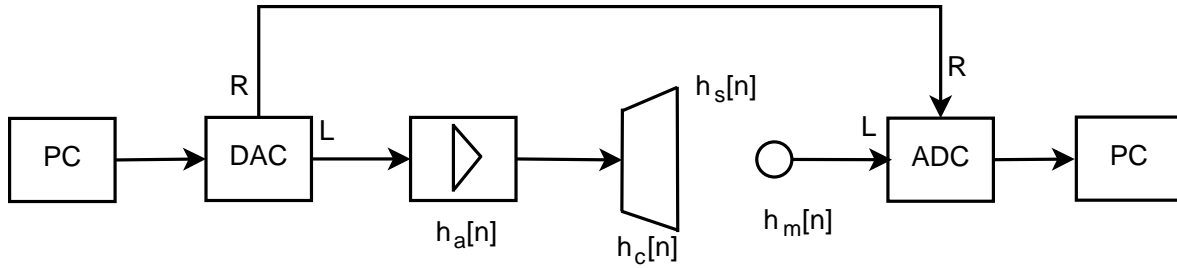


Figura 3.10: Diagrama de blocos do sistema.

de som, sala e microfone. Considerando que estes têm um comportamento LTI e que os elementos digitais e de conversão DAC e ADC (nomeadamente PC e placa de som) não introduzem qualquer não linearidade, a resposta global do sistema é dada por

$$h[n] = h_a[n] * h_c[n] * h_s[n] * h_m[n] \quad (3.14)$$

e pode ser medida recorrendo à técnica descrita na secção anterior.

À equação 3.14 corresponde no domínio da frequência

$$H(\omega) = H_a(\omega)H_c(\omega)H_s(\omega)H_m(\omega) \quad (3.15)$$

Tendo em conta que o objectivo final é caracterizar a influência do microfone, coloca-se agora o problema de isolar a sua resposta, $h_m[n]$, das restantes.

3.4 Extracção da resposta impulsional do microfone

3.4.1 Eliminação da influência da sala

É possível eliminar a influência da sala ($h_s[n]$) de duas formas. A mais simples, mas mais dispendiosa, é usar uma sala anecóica, onde idealmente não existem reflexões, simulando assim propagação no ar livre (*free-field*). A alternativa será simular condições anecóicas numa sala

normal, processo denominado *quasi*-anecóico. O princípio é o seguinte: a resposta de uma sala pode ser vista como uma combinação de som directo e reflexões nas suas superfícies, ou seja, observam-se sucessivos ‘ecos’ da resposta dos restantes elementos do sistema ($h_{acm}[n] = h_a[n] * h_c[n] * h_m[n]$). Se esta for suficientemente curta, é possível isolá-la por truncagem no tempo. Basta posicionar adequadamente os transdutores (fonte e microfone) relativamente às superfícies reflectoras da sala, de forma a evitar que a primeira reflexão se sobreponha ao som directo. A disposição deve ser tal que o intervalo entre a chegada do som directo e da primeira reflexão seja superior à duração útil de $h_{acm}[n]$. Designando esta por T_{acm} e em referência à situação ilustrada na figura 3.11, onde é o solo a superfície reflectora mais próxima, deve garantir-se:

$$\frac{l_1 + l_2}{c} - \frac{d}{c} = \frac{\sqrt{(2h)^2 + d^2} - d}{c} > T_{acm} \quad (3.16)$$

onde c representa a velocidade de propagação do som (m/s). Na prática, a duração útil T_{acm} é determinada estimando, por inspecção visual, o ponto a partir do qual a amplitude de h_{acm} se torna desprezável.

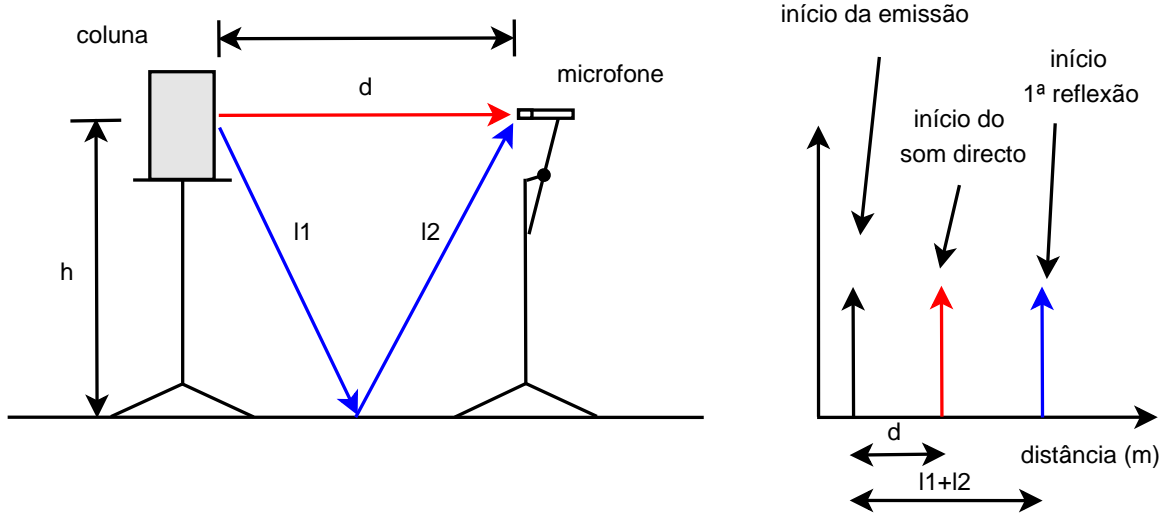


Figura 3.11: Estabelecimento de condições *quasi*-anecóicas.

3.4.2 Compensação da cadeia de medida

As restantes componentes da resposta $h[n]$ não podem ser dissociadas por qualquer processo de truncagem temporal semelhante ao exposto no ponto anterior. A alternativa é adotar um procedimento genérico de compensação da cadeia de medida. O princípio é muito simples: trata-se de determinar um filtro de compensação para cancelar as componentes indesejadas (no caso, $H_{ac} = H_a H_c$) da resposta medida do sistema (H):

$$H_m = H_{acm} H_{ac}^{-1} = H_m H_{ac} H_{ac}^{-1} \quad (3.17)$$

Coloca-se, porém, a dificuldade de medir essas componentes: seria necessário um microfone de resposta perfeitamente unitária (resposta em frequência absolutamente plana):

$$H_{ac} = H_{acm} = H_{ac}H_m \quad \text{quando} \quad H_m = 1 \quad (3.18)$$

Na prática, recorre-se a microfones com desempenho tão próximo quanto possível do ideal. Os melhores destes microfones, ditos *de medida* ou *padrão*, são de utilização relativamente restrita e requerem procedimentos de fabrico e teste particularmente exigentes, o que os torna muito dispendiosos [5]. Podemos adiantar que no trabalho experimental descrito no capítulo seguinte, se adoptou como referência um microfone omnidireccional Behringer ECM8000, uma opção reconhecidamente de muito boa relação qualidade/custo para este tipo de utilização [22].

É importante ainda frisar que, mesmo não sendo perfeitamente plana, a resposta do microfone utilizado como referência estabelece sempre uma base de referência válida para avaliação comparativa de outros microfones (desde que haja o cuidado de manter constantes os restantes elementos da cadeia de medida).

3.5 Direccionalidade

Em geral, a resposta de um microfone depende da sua orientação relativamente ao eixo de propagação da onda sonora - trata-se da *direccionalidade* ou *directividade* do microfone. O eixo de propagação é a linha entre as posições da fonte sonora e do microfone. A orientação do microfone relativamente a esse eixo pode ser completamente definida por dois ângulos (θ, ϕ). No entanto, na maior parte dos casos (tal como para o pistão analisado no capítulo 2), pela simetria do microfone, para efeitos de direccionalidade basta considerar um ângulo (e.g. θ). Podemos expressar a IR em função desse ângulo; habitualmente, apresenta-se normalizada relativamente à direcção axial ($\theta = 0^\circ$). A direccionalidade é função da frequência, pelo que a IR dos microfones é comumente especificada por famílias de gráficos polares mostrando $IR(\theta)$ para um conjunto de frequências (em regra espaçadas logarithmicamente).

Nos ensaios de medição da direccionalidade, é necessário ter algum cuidado na colocação do microfone, para que a mudança de orientação não afecte o posicionamento da cápsula (vide 3.12) De facto, para medir a IR em diferentes orientações, apenas o ângulo de incidência do som na cápsula deve alterar-se.

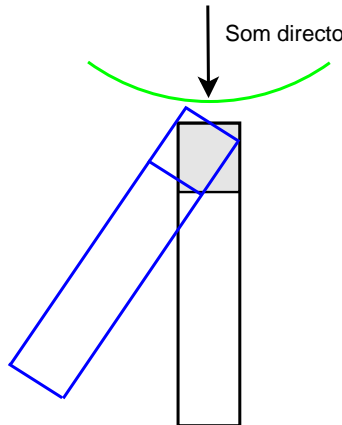


Figura 3.12: Movimentação do microfone para medição da resposta em ângulos distintos.

Se deslocarmos o microfone de forma que altere o eixo de propagação, perdemos coerência nas medições, pois o próprio altifalante apresenta um diagrama de radiação, que com certeza não será omnidireccional para todas as frequências. Justifica-se assim o rigor no posicionamento, e a obrigatoriedade de manter o ponto central da cápsula do microfone sempre no mesmo local.

3.6 Aplicação para medição da IR de microfones

3.6.1 Sinais de teste e sincronismo

O sinal de teste é um *chirp logarítmico* entre 100Hz a 20kHz. É gerado e guardado no canal esquerdo de um ficheiro estéreo (formato *wave*). A gama de frequências pode facilmente ser alterada; optámos por $f_0=100\text{Hz}$ e não 20Hz tendo em vista facilitar a eventual construção do filtro de compensação da cadeia de medida; de facto, a resposta da coluna é menos ‘bem comportada’ a baixas frequências (modos de ressonância da caixa); por outro lado, a pesquisa efectuada indica que as diferenças mais significativas na resposta dos microfones ocorrem na região de altas frequências.

Recorrendo à *data acquisition toolbox* do Matlab, envia-se o sinal de teste para a coluna, via placa de som/amplificador. O canal direito é ligado directamente à entrada da placa de som, fazendo o ‘by-pass’ do sistema em teste (amplificador/coluna/sala/microfone), tal como ilustra a figura 3.9. Este canal é utilizado para conter um sinal de sincronismo. Trata-se de uma marca curta transmitida directamente entre a saída e entrada de som. Esta técnica permite corrigir a variabilidade dos atrasos introduzidos pela parte digital da cadeia áudio e assim determinar sempre com exactidão o atraso real entre emissão e recepção do sinal de teste [23].

3.6.2 Gravação, pós-processamento e visualização

Simultaneamente capta-se o sinal que chega ao microfone. A duração da gravação tem que exceder a do sinal de teste, de forma a capturar toda a resposta do sistema. Na captação da IR de uma sala, tratar-se-ia do tempo de reverberação, que pode atingir vários segundos. Porém, a resposta aqui em causa (h_{acm}) não ultrapassa alguns milissegundos. A figura 3.13 ilustra uma das medições efectuadas. Com o auxílio do sinal de sincronismo (impulso triangular, a verde), podemos identificar na resposta medida o instante de início da emissão e, por consequência, a duração exacta do atraso de propagação. Como é patente pelo eixo das abcissas cotado em distância, esta técnica permite verificar a distância entre fonte e receptor (cerca de um metro, neste caso).

Como conhecemos as distâncias entre o microfone e a coluna e também entre estes e o solo, podemos prever o início da primeira reflexão e truncar a resposta imediatamente antes, como explicado em subsecção - eliminação da influência da sala .

A IR é calculada usando o método de correlação. Construiu-se uma função, *impcorr* para realizar a correlação eliminando a parte anti-causal (que está presente se se usar a função *xcorr* do Matlab).

Usa-se a função *save* para gravar a resposta medida e também o sinal original, com as respectivas marcas de sincronismo, muito importantes para pós-processamento e análise dos resultados.

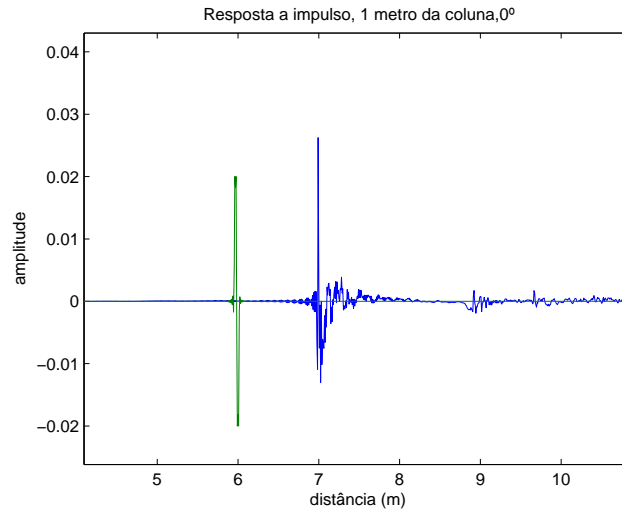


Figura 3.13: Resposta medida (a azul) e sinal de sincronismo (a verde)

Finalmente, apresentam-se os resultados no domínio do tempo e da frequência para permitir uma avaliação imediata, *in situ*, da coerência dos resultados e detecção de eventuais erros grosseiros. Se, por exemplo, a resposta no tempo apresentar algum pico estranho, poderemos estar a captar alguma reflexão não desejada.

3.6.3 *Scripts* e funções auxiliares

geralog.m

Esta função gera um ficheiro *.txt*, com alguns dados do ensaio, como data, hora e nome que lhe queremos associar, bem como apontamentos para consulta futura. Estes dados são importantes para o posterior processamento das respostas. Segue-se um exemplo:

```
Jorge Cubal 36434 2010 - Fortius IV
03-May-2010
15 h 52 min
Medicoes de respostas de microfones
Número de medições: 1
-> 1m0graus
Observações: 1m 0 graus, teste onde se desloca apenas a ponta do microfone.
```

logchirp.m

Neste *script* gera-se um *chirp* *logarítmico*, que é gravado sob a forma de um ficheiro *.wav* para um fácil acesso aos dados a partir de qualquer plataforma. As frequências inicial e final, assim como a amplitude e a frequência de amostragem, podem ser facilmente escolhidas pelo utilizador.

filt_inv.m

Um filtro inverso é construído a partir do *chirp* (vide secção 3.2.2 e figura 3.7).

impcorr.m

Esta função foi concebida para calcular a correlação que dá a resposta impulsional do sistema. Para minimizar o tempo de processamento, usa-se o eficaz algoritmo do Matlab para cálculo da *fft*, a função *fft.m*. De facto, podemos calcular quer a convolução, quer a correlação usando a DTFT (transformada de Fourier discreta). Dadas duas funções $x[n]$ e $y[n]$, as suas convolução e correlação são definidas, respectivamente, por:

$$C_{xy}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]y[n-k] \quad (3.19)$$

$$R_{xy}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]y[k-n] \quad (3.20)$$

A transformada de Fourier de uma função genérica $h[n]$ é dada por

$$H(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{-j\omega n} \quad (3.21)$$

Aplicando a transformada de Fourier a 3.19 e 3.20, obtém-se, respectivamente:

$$C_{xy}(\omega) = X(\omega)Y(\omega) \quad (3.22)$$

$$R_{xy}(\omega) = X(\omega)Y^*(\omega) \quad (3.23)$$

onde Y^* representa o complexo conjugado de Y .

Nesta função tivemos o cuidado de excluir todos os pontos correspondentes à parte anti-causal da resposta, que não tem sentido do ponto de vista físico.

manualfft.m

Obtida a IR do microfone, é necessário analisar o seu espectro (resposta em frequência). Existe uma maneira simples, que é a aplicação directa da função *fft.m*. A função *dacdocfft.m* da *data acquisition toolbox* faz uso da *fft* e devolve a resposta em frequência, acrescentando também um vector com as frequências a que corresponde cada amplitude, muito útil para a representação gráfica. Contudo, se pretendermos um gráfico com o eixo horizontal em escala logarítmica, que torna os dados mais perceptíveis e intuitivos, a *fft* não é uma boa solução, pois usa um intervalo de frequências linear; usando a função *semilogx* para gerar gráficos, acumulam-se muitos pontos na região direita do gráfico e poucos pontos na esquerda. Para obtermos uma distribuição uniforme de pontos no gráfico logarítmico gerado, é necessário que o cálculo da *fft* também seja realizado com um espaçamento logarítmico entre as frequências.

Usando directamente a definição matemática da transformada de Fourier em tempo discreto (DTFT *discrete time Fourier transform*), pode-se seleccionar arbitrariamente o vector de frequências para o qual é efectuado o cálculo. Seja $x[n]$ um sinal discreto com N amostras; a sua DTFT, $X(e^{j\omega})$, com $\omega \in \mathbb{R}$, é dada por:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \quad (3.24)$$

Considerando um vector ω de M frequências, a implementação deste cálculo em Matlab envolve a criação da matriz $e^{-j\omega n}_{[M \times N]}$, resultante da aplicação da exponencial ao produto externo entre o vector $\omega_{[1 \times M]}$ e o vector $n_{[1 \times N]}$. O vector $X_{[1 \times M]}$ resulta do produto interno entre o vector do sinal, $x_{[1 \times N]}$, e a anterior matriz $e^{-j\omega n}_{[M \times N]}$ [23].

Habitualmente, as M frequências são regularmente espaçadas, mas podem ser escolhidas arbitrariamente; no nosso caso, pelas razões já invocadas, pretendemos um espaçamento logarítmico.

A função *manualfft.m* responde a esta necessidade, obtendo a *DTFT* seguindo a definição matemática, com um espaçamento logarítmico nas frequências. Devolve também um vector com as frequências utilizadas, para que facilmente se construa o eixo horizontal do gráfico.

Esta função foi desenvolvida de forma a realizar a *DTFT* com o mesmo número de amostras que a resposta no tempo. Realizou-se um pequeno ensaio comparativo, para avaliar a influência da resolução nos resultados. As figuras 3.14 e 3.15 comparam resultados obtidos com 358 e 3358 amostras. A informação ganha na versão de maior resolução não parece muito significativa, excepto na variação abrupta registada sensivelmente a 4kHz (causada pelo *crossover* da coluna de som - vide capítulo 4).

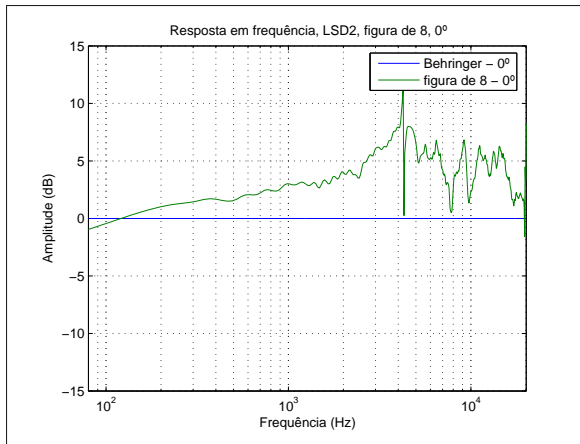


Figura 3.14: Rotina *manualfft.m*, 358 amostras.

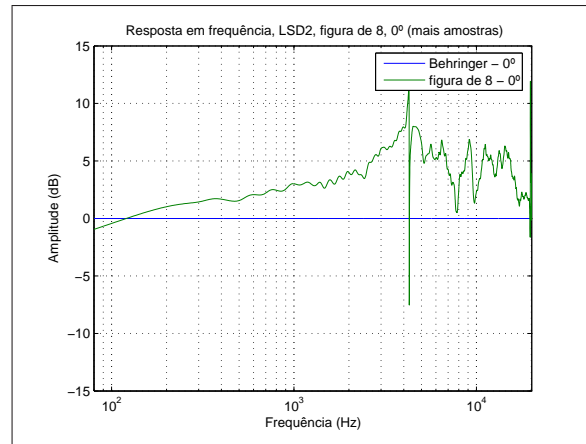


Figura 3.15: Rotina *manualfft.m*, 358+3000 amostras.

Conclui-se que, se não existirem transições bruscas na resposta em frequência, não existe necessidade de utilizar mais pontos no cálculo da *DTFT*. Como este cálculo é pesado, a vantagem de reduzir o número de amostras é sensível em termos de tempo de execução.

3.6.4 Interface com o Utilizador

Recorrendo às ferramentas do Matlab, procurámos construir uma interface gráfica (*graphical user interface* - GUI) simples, como ilustra a figura 3.16, de uso intuitivo e agradável.

A aplicação permite ao utilizador atribuir um nome ao ensaio (nome este que depois fará parte da designação do ficheiro correspondente), a *path* onde guardar o resultado, alguns comentários ou observações que sejam relevantes para uma futura análise, e finalmente as distâncias entre os transdutores e entre estes e o solo. A partir das distâncias é possível (como já foi explicado) calcular onde efectuar a truncatura do sinal sem captar qualquer reflexão proveniente da sala.

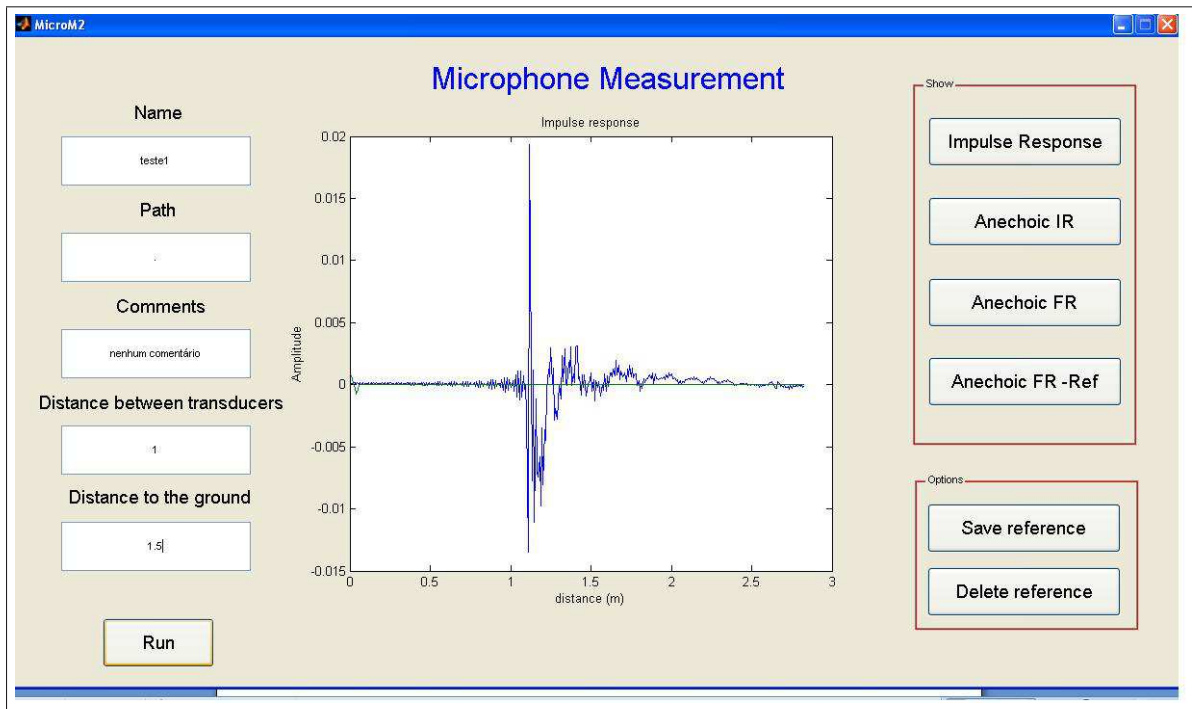


Figura 3.16: Interface para medição de microfones.

Após a introdução destes dados actua-se no botão *Run*, que desencadeia o envio do *chirp* e a medida da resposta do sistema. A visualização *in locu* dos resultados é importante para a detecção de erros grosseiros. Os resultados podem ser apresentados de quatro formas distintas:

- **Impulse Response**- toda a resposta no tempo, incluindo a sala;
- **Anechoic IR** - resposta no tempo sem a sala, apresentada na figura 3.16;
- **Anechoic FR** - resposta em frequência calculada a partir da resposta no tempo sem a ‘contribuição’ da sala;
- **Anechoic FR-Ref** - resposta em frequência compensada.

Esta aplicação permite também medir e guardar a resposta de um microfone de referência, para posteriormente compensar a resposta de um microfone a avaliar.

Após a leitura do respectivo manual ², esta ferramenta de medição de microfones pode ser utilizada facilmente por qualquer utilizador, mesmo que este nada conheça de processamento de sinal ou do próprio Matlab. Ela foi desenvolvida tendo em vista o uso em medições de microfones, contudo pode ser usada para outros fins, como, por exemplo, a medição da resposta impulsional de uma sala.

²Vide Anexo E

Capítulo 4

Ensaio de medição de microfones

4.1 Introdução

Este capítulo descreve e discute medições efectuadas com três microfones de características distintas:

- microfone de condensador omnidireccional (Behringer ECM8000)
- microfone dinâmico supercardióide (Sennheiser Blackfire 541)
- microfone dinâmico cardióide (Shure Prologue 10L).

Os ensaios realizaram-se em dois ambientes acústicos:

- Câmara anecóica para radiação electromagnética existente na sala 345 do DETI, normalmente usada para ensaio de antenas de telecomunicações;
- Sala vulgar (laboratório 317 do DETI).

Utilizou-se a câmara da sala 345 na expectativa de que, embora não especificamente projectada para áudio, proporcionasse também nessa gama de frequência um ambiente razoavelmente livre de reflexões (vide secção 3.4.1 - ‘Eliminação da influência da sala’). Como veremos, os resultados sugerem que não é assim.

Explorou-se então, na sala 317 do DETI, a técnica explicada na mesma secção do capítulo anterior para criação de condições *quasi*-anecóicas.

Os ensaios destinaram-se a analisar como a resposta dos microfones é afectada pelos parâmetros de posicionamento: distância relativamente à fonte sonora e, sobretudo, orientação (estudo de direccionalidade). A metodologia geral de ensaio foi explicada no capítulo anterior. Como já foi aí indicado (secção 3.4.2 - ‘Compensação da cadeia de medida’), os ensaios aqui apresentados obtêm respostas impulsoriais da cadeia amplificador/coluna/microfone (h_{acm}) e não apenas do microfone (h_m). Foi utilizado um microfone omnidireccional de resposta razoavelmente plana, o *Behringer ECM8000*¹, para estabelecer uma referência comparativa (obtida no ensaio a 0°) para os ensaios quer de outros microfones quer dele próprio para ângulos de captação diferentes de 0° ($\phi \neq 0^\circ$).

¹Vide Anexo A

A análise da *datasheet* deste microfone e múltiplas referências encontradas na literatura ao seu uso como microfone de medição [22], indicam que se trata de uma boa escolha para este efeito.

Assim, todos os resultados serão referidos a uma primeira IR medida com o *Behringer ECM8000* direccionado para a fonte (resposta axial); a resposta em frequência desta IR de referência não será plana, pois tem toda a cadeia de medida associada.

Para além dos microfones as medições envolveram ainda os seguintes equipamentos (iguais em todas as medições - vide figura 3.9):

- Coluna JMLab, com impedância nominal de $8[\Omega]$ e potência máxima $75[W]$.
- Amplificador Grundig V340.
- Placa de som, *Edirol Audio Capture* UA-5.
- PC com o Matlab instalado.

4.2 Ensaios em câmara anecóica

O DETI dispõe de uma câmara anecóica, que foi usada para medir o microfone Behringer ECM8000 segundo o método explicado no capítulo anterior. Ela possui uma plataforma giratória dotada de um sistema muito preciso de controlo de posicionamento angular (ϕ). Na figura 4.1 vemos o microfone colocado nessa plataforma. A coluna para reprodução do sinal de teste encontra-se a sensivelmente 6m do microfone (não existe muita liberdade para a alterar a sua colocação dentro da câmara). Nestas condições, mediu-se o microfone de 0° a 90° com incrementos de 15° .



Figura 4.1: Medição em câmara anecóica, usando a plataforma giratória.



Figura 4.2: Medição em câmara anecóica aproximando os transdutores.

A resposta obtida (vide figuras 4.3 e 4.4 - esta uma ampliação de parte da anterior) mostrou-se anormalmente longa (ideia confirmada pelos ensaios em condições *quasi*-anecóicas,

apresentados adiante), parecendo sugerir que a câmara utilizada é susceptível a ressonâncias/ruído na gama de frequência áudio, sendo por isso inadequada para este trabalho.

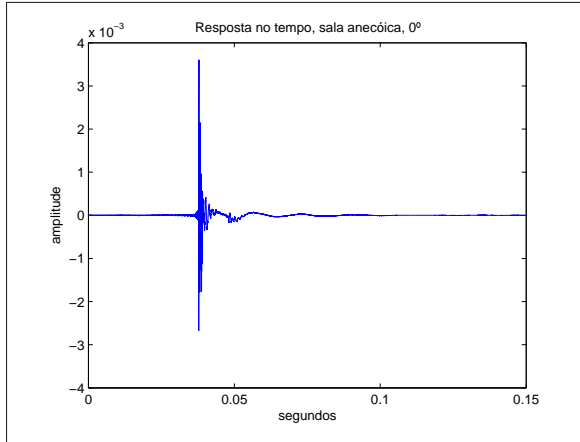


Figura 4.3: Resposta no tempo, Behringer na sala anecóica, 6m.

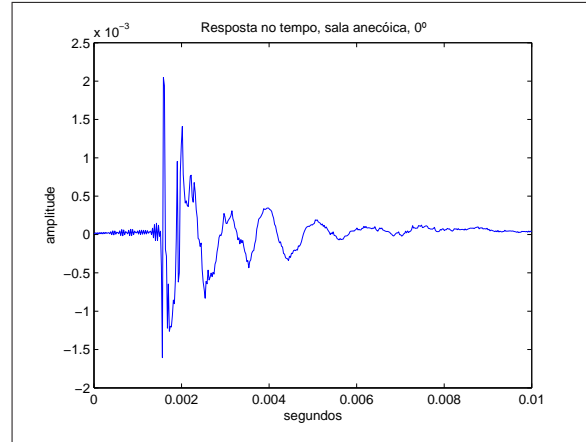


Figura 4.4: Resposta no tempo, Behringer na sala anecóica, ampliada.

Ponderou-se experimentar uma outra disposição, ilustrada na figura 4.2, com o intuito de encurtar a distância entre a coluna e o microfone e assim aumentar a relação sinal/ruído (na suposição de que o problema observado fosse originado por ruído). Contudo, como é visível, o solo naquela zona da câmara não possui os cones que evitam as reflexões, pelo que as condições seriam seguramente não-aneecóicas.

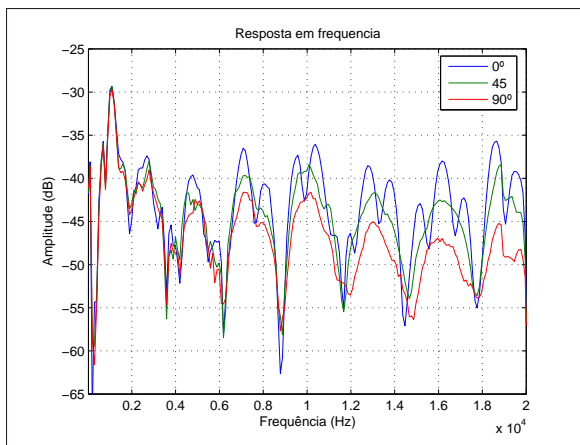


Figura 4.5: Resposta em frequência (toda a cadeia de medida).

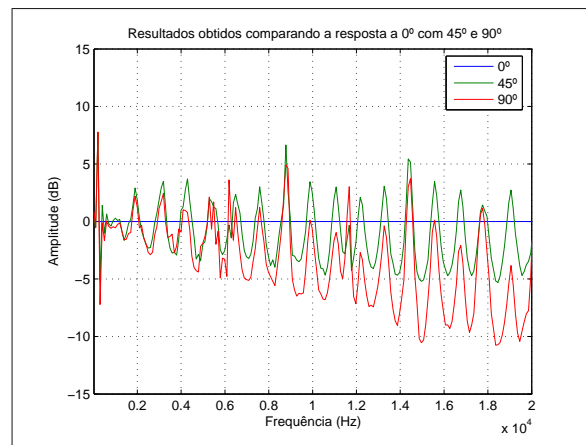


Figura 4.6: Resposta em frequência relativa (cadeia de medida compensada).

Para finalizar a análise dos resultados obtidos (ainda que claramente anómalos, pelo menos na região de baixa frequência), apresentamos a resposta em frequência. Os gráficos são mostrados nas figuras 4.5 e 4.6, usando uma escala horizontal linear, pois existem muitos lóbulos igualmente espaçados, que numa escala logarítmica se acumulariam na zona direita das figuras, tornando-se pouco perceptíveis. Usamos a resposta axial do microfone Behringer

como referência de comparação para as respostas obtidas sob outros ângulos de captação. Estes gráficos da resposta em frequência solidificam a ideia de que os resultados são anómalos. Existem lóbulos igualmente espaçados que não estão de acordo com o que seria esperado na resposta de um microfone, tendo em conta a informação dos fabricantes e o modelo do pistão estudado no capítulo 2 (secção 2.1).

Apesar das anomalias identificadas, os resultados seguem um padrão que vai de encontro à expectativa pelo menos em um aspecto: as altas frequências atenuam-se de forma mais acentuada do que as baixas à medida que nos afastamos da direcção axial.

4.3 Ensaios em condições *quasi*-anecóicas

O estabelecimento de condições *quasi*-anecóicas é uma solução muito mais prática que o recurso a uma sala anecóica de excelente qualidade, geralmente dispendiosa, e permite enorme portabilidade na medição da resposta de microfones. Os ensaios que se seguem foram realizados na sala 317 do DETI.

4.3.1 Ensaio 1 - Microfone de condensador (omnidireccional)

Resposta axial

A figura 4.7 mostra a montagem realizada, com o microfone Behringer ECM8000 e a coluna dispostos de forma a medir a resposta axial ($\phi = 0^\circ$). A figura 4.8 mostra a placa de som e amplificador utilizados.

Em referência à figura 3.11, $d=1\text{m}$ e $h=1.4\text{m}$.

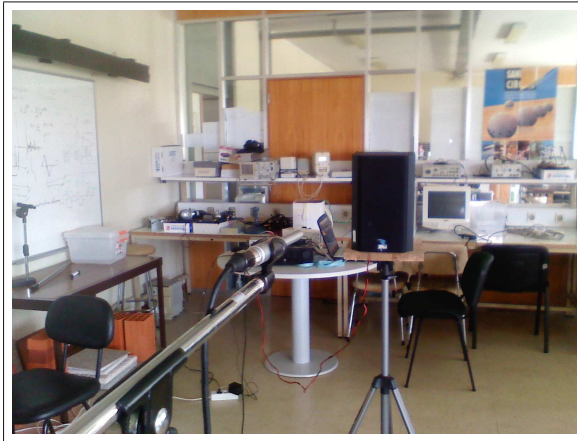


Figura 4.7: Medição da resposta axial (Behringer ECM8000).



Figura 4.8: Equipamentos: placa de som e amplificador.

Pode-se verificar que quando captamos a primeira reflexão, a amplitude do sinal correspondente ao som directo já está muito próxima de zero. Não perdemos assim informação com a truncatura do sinal no tempo, e conseguimos isolar a resposta do microfone da resposta da sala.

A duração da resposta a trincar é facilmente determinável; não é necessário visualizar a figura 4.9 para saber onde ela começa e termina. Usando a função *max* do Matlab encontramos

o pico correspondente à recepção do sinal de sincronismo - o ponto de início da resposta. Como sabemos as distâncias entre microfone, fonte e superfícies reflectoras, podemos prever quando começa a primeira reflexão, e trincar o sinal um pouco antes, para garantir uma ligeira margem de segurança.

O eixo horizontal pode ser apresentado em tempo ou em distância, tendo em conta a relação:

$$t = \frac{d}{c} \quad (4.1)$$

A escala em distância (m) torna mais fácil relacionar a zona de truncagem com a disposição física dos equipamentos na sala. Mas se fixarmos que o som demora sensivelmente 3ms para percorrer um metro no ar ($c = 344m/s$ a $20^\circ C$), facilmente relacionamos os tempos e distâncias envolvidos.

A figura 4.9 apresenta a resposta medida, incluindo as reflexões da sala (que irão ser truncadas). A figura 4.10 isola apenas a parte da resposta considerada válida. A resposta inicia-se com a marcação feita pelo sinal de sincronismo, e termina antes da chegada da primeira reflexão.

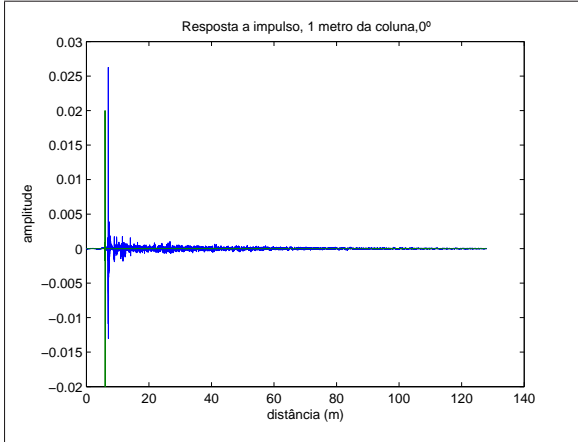


Figura 4.9: Resposta a 0° (Behringer), com algumas reflexões.

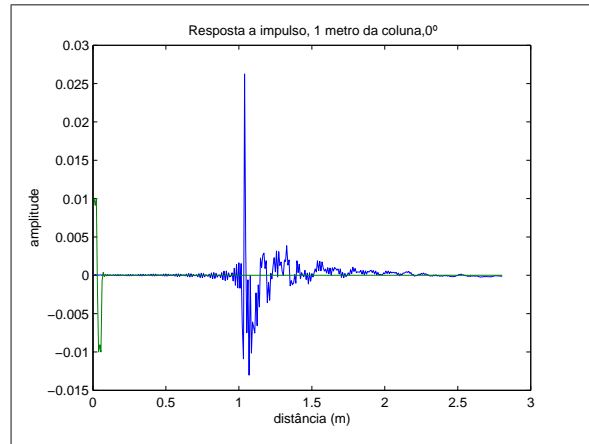


Figura 4.10: Resposta a 0° (Behringer), apenas na zona de interesse.

Esta resposta axial do Behringer servirá posteriormente como referência para outras medições.

Medição para vários ângulos

Efectuaram-se medições para diversos ângulos, seguindo os passos já explicados. Na sala 317 do DETI não é possível ter o rigor no ângulo de posicionamento que conseguimos com a plataforma giratória da sala anecóica. Contudo, conseguem-se medir ângulos espaçados com razoável precisão e demonstrar a influência do ângulo de posicionamento numa captação. Mediram-se os seguintes posicionamentos: 0° , 22.5° , 45° , 67.5° e 90° . A resposta no tempo de cada um dos ângulos medidos é muito similar à da figura 4.10, obtida a 0° ,². Os gráficos de

²No Anexo A, encontram-se *sripts* que permitem reproduzir todos os gráficos no tempo, para os diferentes ângulos de captação

maior interesse são os da resposta em frequência. A figura 4.11 mostra os resultados obtidos na medição da resposta do Behringer ECM8000 para vários ângulos. Como esperado, vemos que a baixas frequências os resultados são muito similares e as diferenças entre as respostas acentuam-se com o aumento da frequência.

O pico negativo que ocorre a pouco mais de 4kHz manifesta-se em todas as medições, para qualquer distância entre transdutores (vide 4.12) e para qualquer microfone, pois, como mais à frente veremos, também se observa nas medições com o Sennheiser 541 e o Shure Prologue. Pode justificar-se pelo *crossover* entre graves e agudos na coluna.

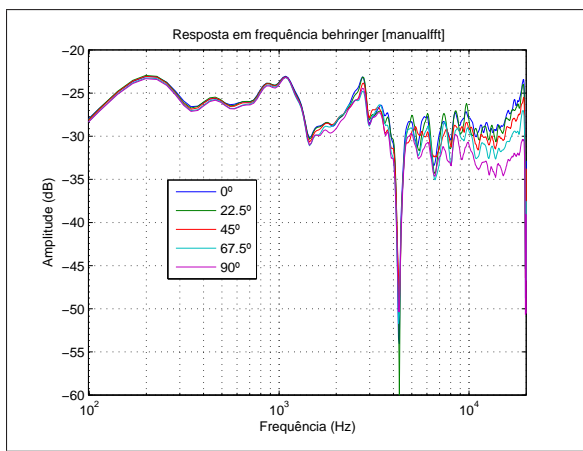


Figura 4.11: Resposta em frequência para vários ângulos, Behringer ECM8000.

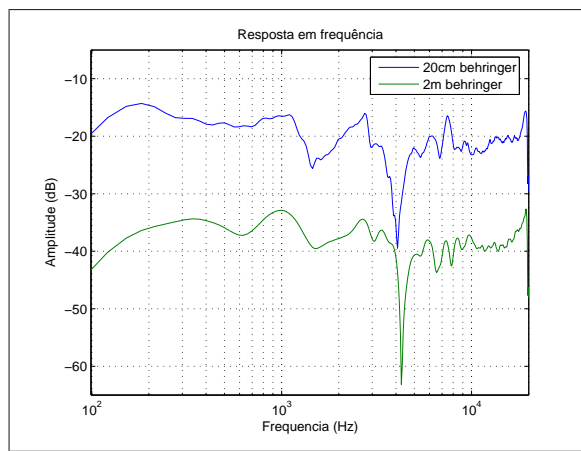


Figura 4.12: Comparação das respostas em frequência para 20cm e 2m.

Na figura 4.12, além da diferença de amplitude devida às diferentes distâncias que o som percorre, não se observam mais diferenças notórias. A forma das respostas é muito semelhante, tal como esperávamos.

O intuito do trabalho é medir a resposta em frequência de microfones, mas até agora temos medido a resposta da cadeia amplificador/coluna/microfone. É esta que a figura 4.11 mostra. Para obtermos a resposta somente do microfone temos que considerar que a resposta axial do Behringer é completamente plana, o que aliás corresponde sensivelmente ao que indica a especificação do fabricante. Nestas condições, elaborou-se o gráfico da figura 4.13.

Como nos encontramos no domínio da frequência e a amplitude está representada em dB, para usar o microfone na orientação $\phi = 0^\circ$ como referência simplesmente subtraímos a sua resposta axial das respostas medidas com outros microfones (ou, neste caso, das respostas medidas com o próprio microfone de referência para as diversas orientações).

Apesar de se manifestar em todas as direcções, o pico de *crossover* da coluna é mais acentuado a 0° ; daí a existência de um pico a pouco mais de 4kHz para outros ângulos. Ignorando este efeito, a ideia geral que extraímos dos resultados obtidos é que vão de encontro ao esperado teoricamente e de certa forma também ao modelo do pistão estudado inicialmente. Para baixas frequências, o ângulo de captação é de pouca relevância na qualidade da gravação, mas para frequências mais elevadas as diferenças são notórias. Mesmo um microfone de qualidade e omnidireccional como o Behringer ECM8000 perde a sua omnidireccionalidade para altas frequências.

Para o caso extremo em que a captação é perpendicular ao eixo, observa-se uma atenuação

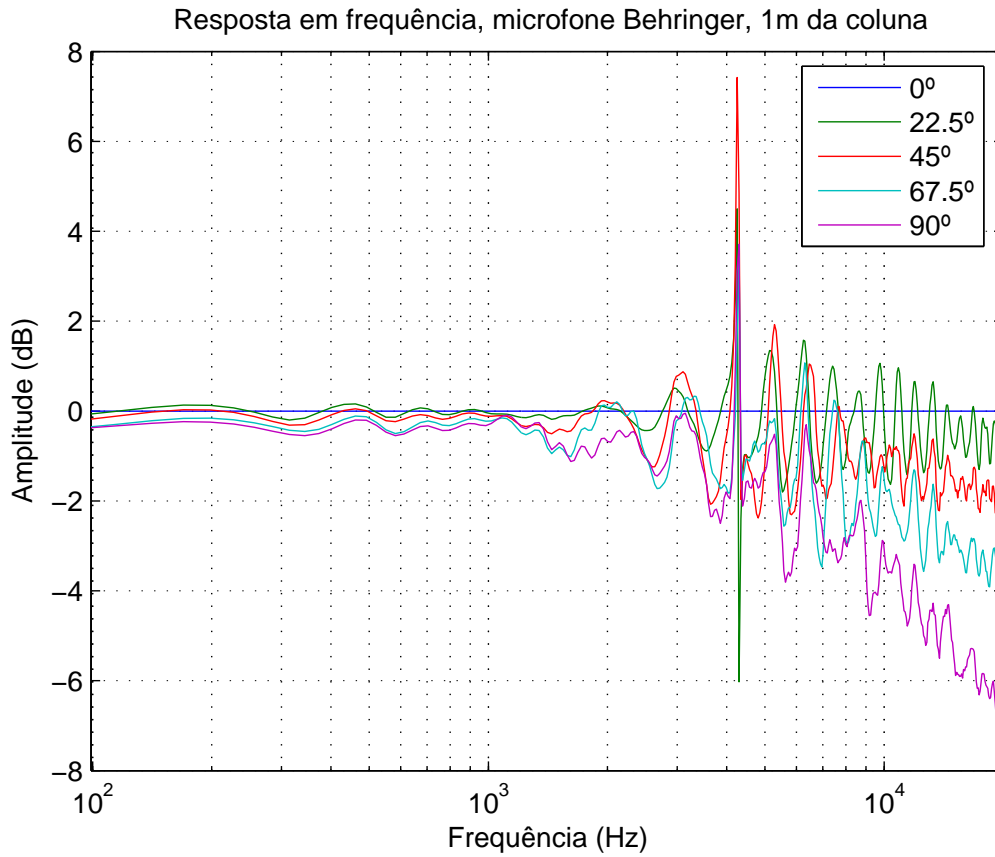


Figura 4.13: Resposta em frequência (Behringer) relativa à IR a 0°

que ultrapassa os 4dB acima de 10kHz, o que, em certas circunstâncias pode ser significativo na qualidade da captação.

4.3.2 Ensaio 2 - Microfone dinâmico (supercardióide)

Procedeu-se à medição da resposta de outro microfone, o Sennheiser 541, para comparação com os resultados obtidos com o Behringer. Este microfone possui um padrão direccional supercardiíde, com uma resposta em frequência de 30Hz a 20kHz, segundo o fabricante. Possui um comutador que permite acentuar as altas frequências. As medições realizadas foram executadas com este comutador desligado.

O posicionamento dos transdutores foi exactamente igual ao da experiência anterior. Mediram-se respostas em três orientações: 0° , 45° e 90° . Não se considerou necessário realizar tantas medidas como na secção anterior, pois o objectivo é a comparação com o Behringer e não tanto o pormenor das diferenças do ângulo de captação, pois sabemos que este é supercardiíde, e as diferenças obtidas fora de eixo serão maioritariamente devidas à sua direccionalidade.

A resposta no tempo do Sennheiser 541 a 0° apresenta-se na figura 4.14. Visualmente, é similar à do Behringer; não há diferenças notórias entre respostas temporais. Para outros ângulos de captação, as diferenças só são significativas em termos de amplitude da resposta;

a forma é semelhante.

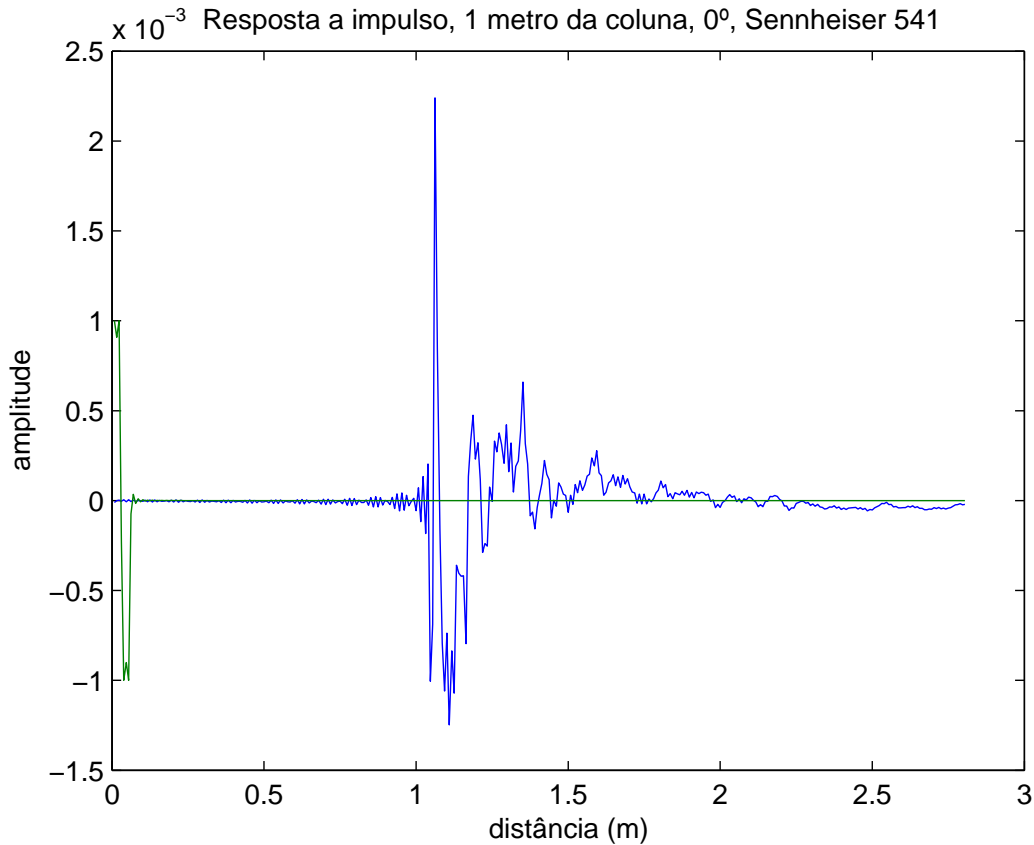


Figura 4.14: Resposta a 0° (Sennheiser 541), com 1m entre os transdutores.

Não se justifica a apresentação das respostas sob outros ângulos pela mesma razão já referida anteriormente: são muito similares.

Vamos comparar o nosso microfone de referência (Behringer), que consideramos possuir uma resposta plana na gama de frequência estudada, com o Sennheiser. A figura 4.15 mostra a resposta do Sennheiser 541 para três ângulos distintos. Na realidade, temos a resposta do microfone e de toda a cadeia de medida, tal como sucedia com o Behringer. Podemos facilmente localizar o efeito provocado pelo filtro de *crossover* a cerca de 4kHz, que também se verificava nos resultados do Behringer. Comprova-se que este fenómeno não se deve ao microfone, pois, independentemente do modelo usado, ele manifesta-se.

Analisando os resultados verificamos que as respostas em frequência são muito semelhantes até aos 4kHz, diferindo apenas em amplitude. Segundo a *datasheet* do fabricante, para baixas frequências, a atenuação entre a captação a 0° e a captação a 90° é cerca de 10dB, que se devem à sua direccionalidade supercardióide. Na captação efectuada, verifica-se de forma um pouco grosseira esta atenuação, sobretudo até 5kHz. Para frequências mais elevadas, o comportamento do microfone não é regular, apresentando diferentes resultados para os ângulos captados.

Para separar a resposta do microfone da da restante cadeia de medida, usamos a resposta axial do Behringer como referência. A figura 4.16 ilustra os resultados obtidos. A diferença

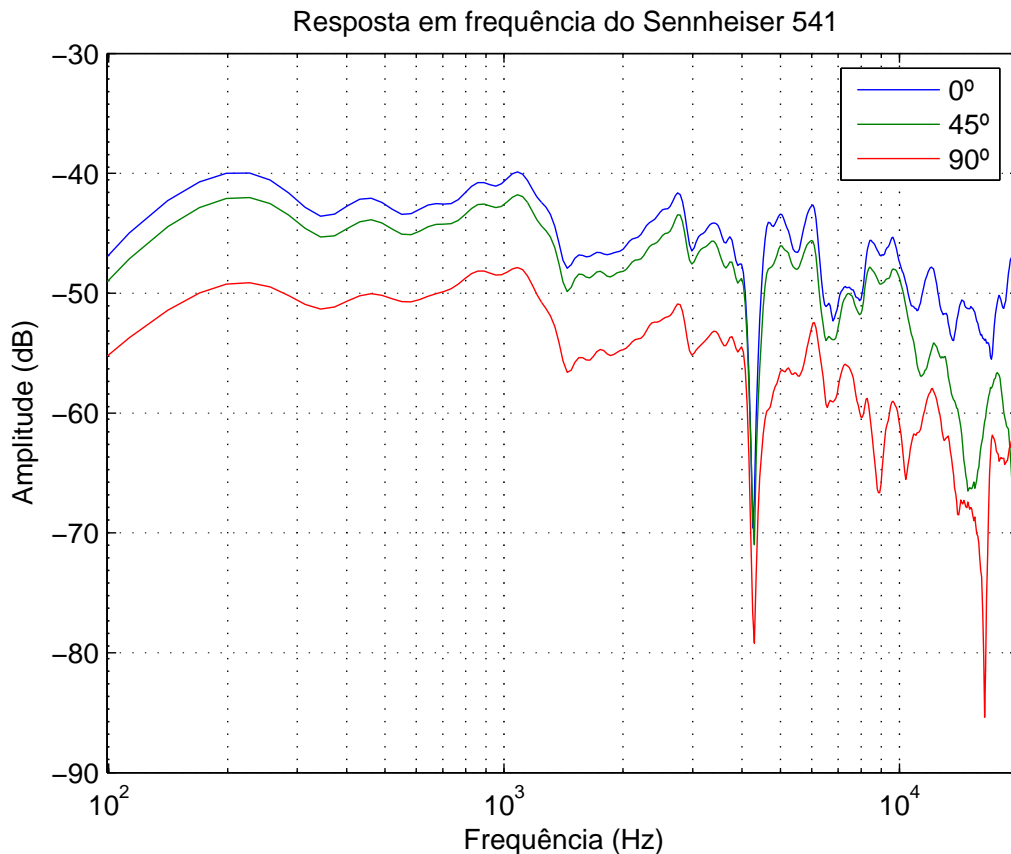


Figura 4.15: Resposta em frequência (Sennheiser 541) para três orientações.

de amplitude não é importante; trata-se apenas de uma atenuação devida à própria captação do microfone.

Analisando os resultados, vemos que para qualquer ângulo de captação a resposta em frequência é bastante plana até sensivelmente 4 kHz. Depois, a sua forma torna-se irregular, denotando uma forte atenuação para a zona de altas frequências, próximo dos 20 kHz. Existe atenuação mesmo na própria captação a 0°.

Relativamente à resposta axial, o fabricante indica um ligeiro decréscimo da amplitude para as altas frequências; entre 10 kHz e 20 kHz ela decai linearmente 4 dB. Os resultados obtidos diferem um pouco: o decréscimo não é linear, existe um pico negativo próximo dos 15 kHz, e a atenuação surge um pouco superior aos 4 dB mencionados.

Concluimos que o Sennheiser 541 é um microfone que introduz colorações a altas frequências, não apresentando uma resposta uniforme nesta região do espectro. Não é indicado para captações onde o microfone não acompanhe o movimento da fonte, pois como se trata de um supercardióide não responde de igual forma sob diferentes orientações. Se, lateralmente ao microfone, surgirem fontes com forte presença nas altas frequências, poderão surgir colorações no sinal captado, pois o comportamento do microfone é irregular e apresenta lóbulos proeminentes na zona dos agudos.

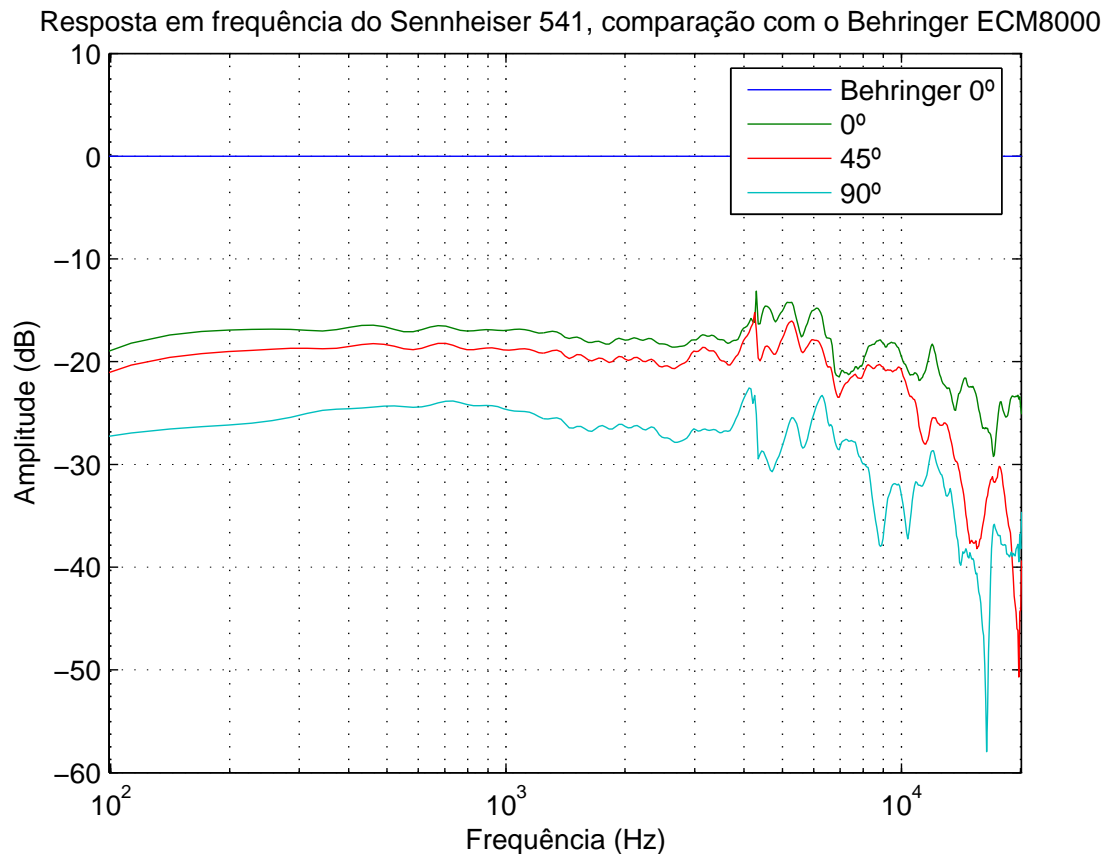


Figura 4.16: Resposta em frequência relativa (Sennheiser 541)

4.3.3 Ensaio 3 - Microfone dinâmico (cardióide)

O microfone Shure Prologue 10L é do tipo dinâmico, de baixa impedância (a série 10 apresenta dois modelos: 10L, de baixa impedância (*low*) e 10H, de alta impedância (*high*)). A sua resposta direccional é cardióide, e o fabricante indica que a sua gama de resposta é de 80Hz a 10kHz. Apesar de se tratar de um microfone com uma gama de frequências mais estreita do que os anteriores, a medição usou como sinal de teste o *chirp* no intervalo [100Hz-20kHz]. Apenas a resposta acima de 10kHz não será tida em conta, pois o microfone não foi concebido para operar acima desse limite.

Novamente, manteve-se a disposição do equipamento: $d=1\text{m}$ e $h=1.40\text{m}$ em (relação ao esquema da figura 3.11). Todas as restantes condições são iguais às das duas medições anteriores.

Na figura 4.17 temos a resposta no tempo do Shure Prologue 10L. Mais uma vez, no domínio do tempo é difícil encontrar diferenças para os diferentes ângulos de captação. A única distinção clara é a amplitude do sinal, que é maior a 0° , como seria de esperar devido à direccionalidade do microfone. Não são apresentadas outras figuras com a resposta para diferentes ângulos, pois não se observam alterações relevantes.

A figura 4.18 mostra as respostas em frequência para vários ângulos (calculadas a partir das respostas no tempo truncadas). Confirma-se o pico negativo correspondente ao *crossover*

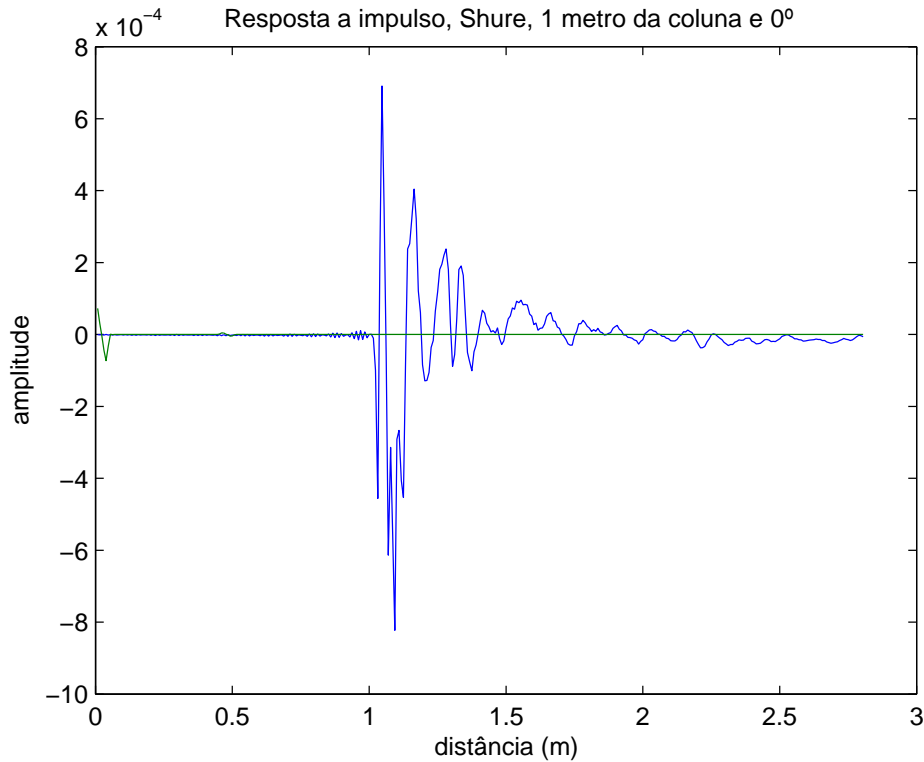


Figura 4.17: Resposta (Shure Prologue 10L) a 1m e 0°.

da coluna.

A resposta em frequência mostrada na figura 4.19 é truncada pouco acima de 10kHz, pois não faz sentido analisar os resultados fora da gama para a qual o microfone foi concebido. Note-se que o microfone Behringer foi medido sob as mesmas condições do Shure, tanto em distância entre transdutores como amplificação nos equipamentos usados.

Entre os microfones pesquisados, este é o único para o qual o fabricante apresenta a resposta em frequência para $\phi \neq 0^\circ$, para a gama de funcionamento do microfone. Como podemos ver na figura 4.20, é apresentada a resposta a 0°, 90° e 180°. Como a Shure não fornece nenhum gráfico polar, mostra desta forma a resposta do microfone. É interessante este gráfico para testar o nosso sistema, pois podemos validar a qualidade do Behringer ECM8000 como microfone de medição e também avaliar a qualidade e precisão do método empregue.

A resposta fornecida pelo fabricante é semelhante à medida, com apenas ligeiras diferenças pontuais de amplitude. A diferença em torno de 5dB entre a captação a 0° e a 90° indicada pelo fabricante é confirmada na medição realizada. É difícil ser preciso nos valores das diferenças entre as respostas do fabricante e medida, contudo podemos afirmar que a forma dessas respostas é muito similar. Visualmente, as semelhanças são claras. Existem dois picos negativos coincidentes entre as respostas do fabricante e as respostas medidas a aproximadamente 5kHz e 9kHz.

Para uma análise da variação da resposta com a amplitude do sinal de excitação, ajustou-se o amplificador de forma a que a 1kHz a resposta do Shure Prologue coincidissem com a do Behringer, tal como o fabricante apresenta. Como o Behringer possui uma sensibilidade muito

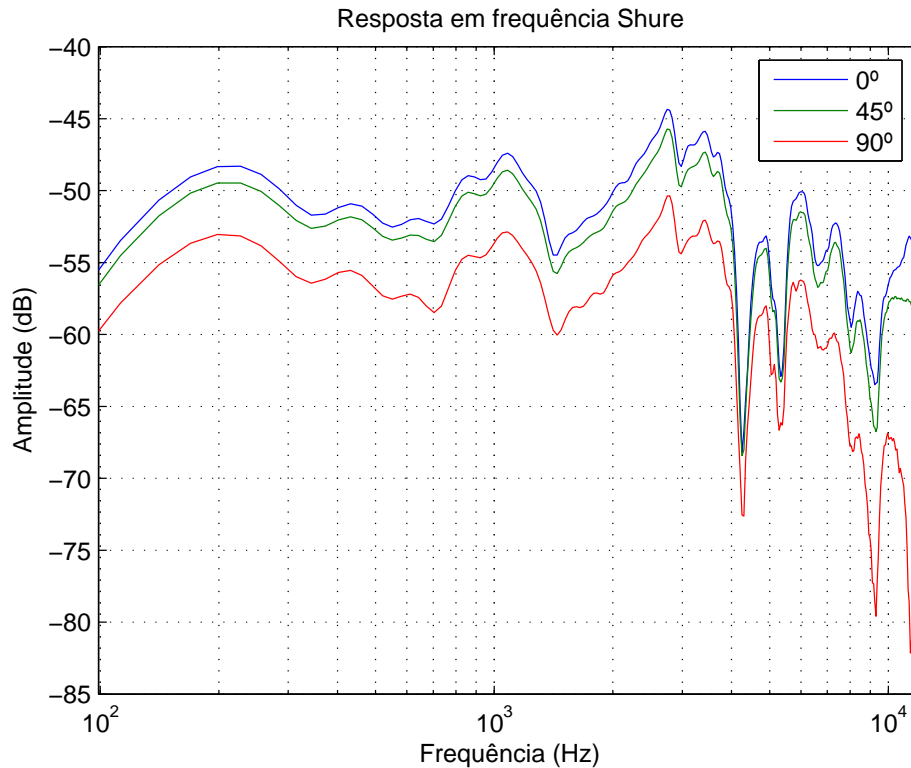


Figura 4.18: Resposta em frequência (Shure Prologue 10L)

maior, temos que diminuir bastante a amplificação para obter os resultados da figura 4.21. Mediu-se o Shure a 0° e 90° com uma determinada amplificação, posteriormente mediu-se o Behringer a 0° com uma redução da amplificação efectuada, ajustando esse valor até obter o resultado pretendido. Ajustou-se a escala horizontal para o intervalo [50Hz-13kHz].

Temos então os resultados sob duas formas distintas: na figura 4.19 mede-se o microfone de referência e o microfone a testar exactamente nas mesmas condições. Na figura 4.21 ajustamos a amplitude do sinal no amplificador para obter uma resposta exactamente como o fabricante apresenta e assim verificar a linearidade da resposta de microfones; de facto, a variação da amplitude do sinal não afectou os resultados.

O pico a 4kHz devido ao *crossover* da coluna poderá ser influenciado pelo volume a que esta opera. Maior potência na coluna poderá amplificar este efeito. Usando o método de comparação, a resposta do Behringer poderá não sofrer tanto deste efeito por possuir menor amplificação nesta medição. Ignorando esta irregularidade, obtiveram-se resultados muito semelhantes aos da figura 4.19. Pode-se afirmar que a diferenças na amplitude da IR medida entre o Behringer e o Shure Prologue se devem apenas às características do microfone, mais concretamente à sua sensibilidade.

Fazendo uma comparação entre os dados do fabricante e os resultados nestas condições, encontram-se muitas semelhanças. A forma e a diferença de amplitude entre a captação axial e a captação perpendicular à fonte é muito similar.

Estes resultados são importantes sobretudo para validação do nosso sistema; podemos afirmar que ele apresenta resultados muito coerentes com os fornecidos pelos fabricantes.

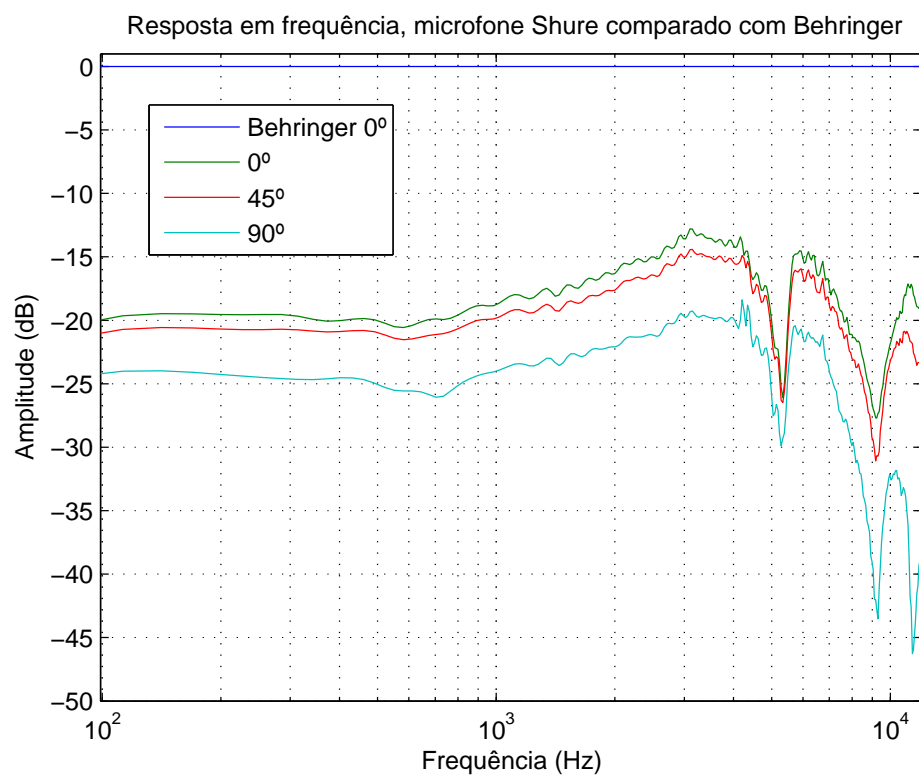


Figura 4.19: Resposta em frequência relativa (Shure Prologue 10L).

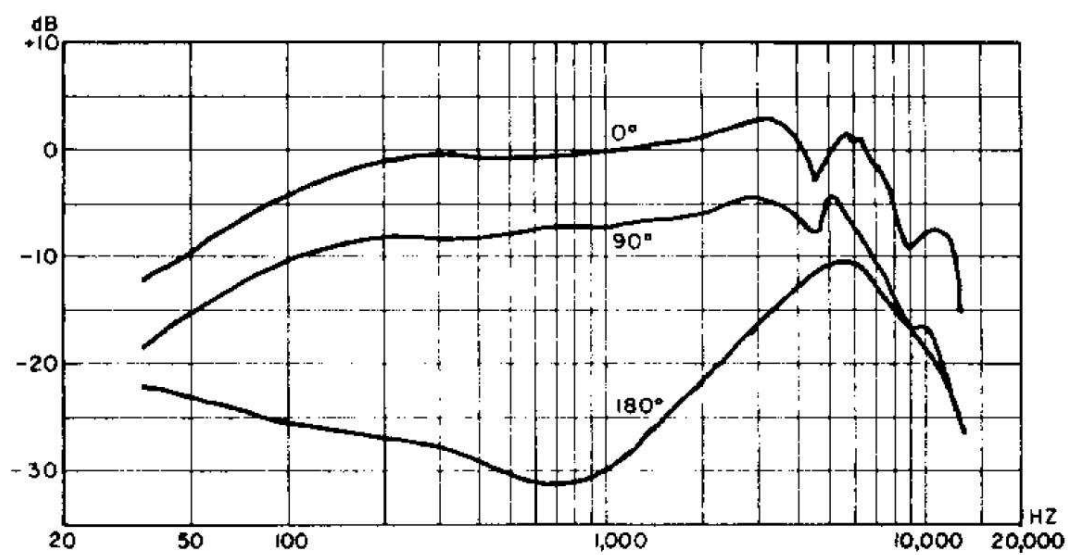


Figura 4.20: Resposta em frequência dada pelo fabricante (Shure Prologue 10L).

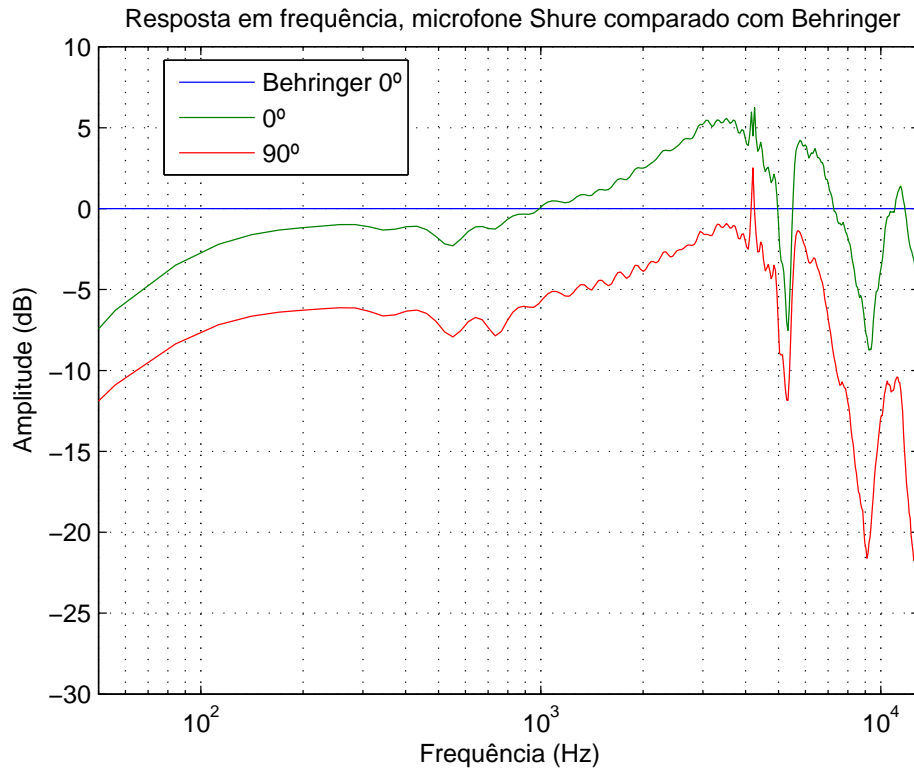


Figura 4.21: Resposta em frequência (Shure prologue 10L), com amplificação ajustada.

Note-se que os métodos de calibração e medida usados pelos fabricantes, sobretudo os mais conceituados, são muito mais sofisticados e dispendiosos.

Para obtenção de respostas tão parecidas com as disponibilizadas pelos fabricantes é também necessário ter em conta que o microfone de referência deverá aproximar realmente uma resposta plana. Portanto, face aos resultados atingidos, podemos inferir que o Behringer ECM8000 é um microfone com uma resposta em frequência bastante plana, e pode ser usado como microfone de referência para medições de outros transdutores.

Com o método da comparação de microfones, usando um bom microfone de referência, consegue-se compensar a cadeia de medida na medição da resposta de microfones, que geralmente é um ponto crítico. Quando se medem respostas de salas é perfeitamente admissível desprezar a cadeia de medida, pois a resposta da sala sobrepõe-se fortemente em tempo e amplitude à resposta do microfone e da coluna usada. Porém, não é assim quando queremos medir transdutores, como vimos; algum método de compensação ou comparação é indispensável.

Sem equipamentos muito dispendiosos conseguimos medir microfones de forma bastante satisfatória. Recorrendo a uma sala de aula vulgar é possível medir com razoável rigor respostas curtas como são as de transdutores, e eliminar todo o ambiente circundante. O uso da técnica de sincronismo apresentada facilita a obtenção de resultados temporais rigorosos.

Este método torna possível em qualquer local a medição de microfones, de forma muito pouco dispendiosa.

Capítulo 5

Captação estéreo

Inicialmente as captações acústicas eram realizadas usando um único ponto de captação (único microfone). Com a investigação e desenvolvimento tecnológico dos equipamentos surgiram técnicas multi-microfone e, associadas, técnicas de processamento e reprodução multi-canal (estereofonia). A reprodução estereofónica requer captação com múltiplos microfones.

Durante os anos 30 do século passado, investigadores como Alan Blumlein no Reino Unido e Arthur Keller e Harvey Fletcher nos laboratórios Bell, nos Estados Unidos, iniciaram experiências na área da estereofonia. A título de curiosidade, o primeiro uso comercial de som multi-canal foi a produção da *Disney Studios Fantasia*, em 1940 [4].

Nos anos 50, os formatos multi-canal diversificaram-se e foram aplicados a produtos comerciais. Primeiro em filmes, depois em aplicações pessoais como cassetes, discos, e rádio. Geralmente, uma área tecnológica deve resultar em produtos comercializáveis e lucrativos para que se possa desenvolver; a engenharia de áudio não foge a esta regra.

Os primeiros discos estereofónicos foram encarados como uma extraordinária inovação tecnológica e tiveram enorme sucesso comercial. À medida que os ouvintes e equipamentos de reprodução se foram tornando mais sofisticados, a qualidade das gravações melhorou substancialmente e tornou-se um factor decisivo na manutenção do sucesso da indústria discográfica.

A estereofonia expandiu-se rapidamente e actualmente está presente em inúmeros equipamentos do nosso dia-a-dia, não só aparelhagem de som mas também salas de cinema, televisores, consolas de jogos, computadores, telemóveis ou leitores de mp3. A estereofonia é habitualmente associada a reprodução em apenas dois canais, mas vêm-se vulgarizando sistemas estereofónicos com mais de dois canais - normalmente denominados sistemas de som *surround*.

Criar uma imagem estéreo convincente é a base para a arte da gravação estéreo. É essencial ter experiência com as técnicas básicas e conhecer os seus atributos para trabalhar com os formatos estéreo. A arte da gravação consiste em criar ilusões auditivas, enquanto a ciência de uma captação envolve as ferramentas e técnicas usadas para criar essas ilusões [4].

Qualquer tipo e número de microfones pode ser usado numa captação. As técnicas de colocação podem dividir-se essencialmente em três categorias:

- microfones espaçados
- microfones coincidentes
- multi-microfone

5.1 Técnicas com microfones espaçados

Esta categoria tira partido do espaçamento entre dois microfones para criar a noção estéreo no sinal gravado. As técnicas mais usuais que usam este princípio são a AB, ORTF e binaural [15].

5.1.1 Estereofonia de tempo: técnica AB

O posicionamento AB, tipicamente, envolve dois microfones cardioides voltados directamente para a fonte, paralelos entre si (ângulo nulo), e ligeiramente afastados, tal como ilustra a figura 5.1. Há essencialmente dois parâmetros envolvidos na localização uma fonte sonora por um ouvinte: a diferença temporal e a diferença de intensidade entre os sinais que atingem cada ouvido (respectivamente *interaural time difference* - ITD e *interaural intensity difference* - IID). A técnica AB tira partido de apenas um deles - a ITD. Por esse motivo, é particularmente susceptível a cancelamento de fase.

Nas componentes com comprimentos de onda iguais ou menores à distância entre as cápsulas, podem surgir oposições de fase em alguns ângulos de captação. A distância entre a fonte sonora e os microfones deve ser grande, de forma a tornar desprezável a atenuação de nível resultante do trajecto suplementar entre as cápsulas. Como facilmente se deduz das suas características, esta técnica apresenta deficiente compatibilidade com o formato monofónico.

Se a fonte sonora for frontal aos microfones, é captada por ambos sem qualquer diferença de tempo e é localizada no centro da imagem estéreo. Se a colocação não for frontal, existirá uma diferença temporal entre a chegada do som a cada um dos microfones. É esta diferença de tempo entre cada canal que provoca no ouvinte a sensação estereofónica.

O posicionamento AB pode captar uma imagem estéreo muito ampla em gravações ao vivo. Tem um grupo leal de seguidores, não sendo contudo uma técnica muito consensual [15].

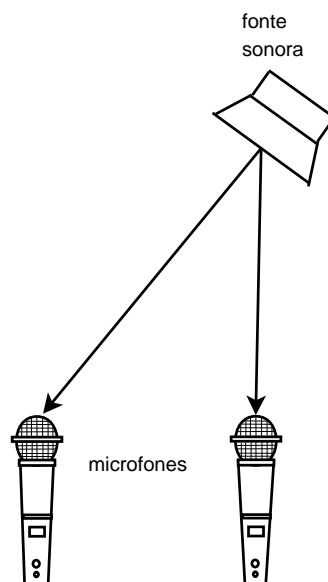


Figura 5.1: Técnica AB.

5.1.2 Estereofonia de tempo e intensidade. Técnica ORTF

A estereofonia de tempo e intensidade utiliza os dois parâmetros de localização estereofónica: ITD e IID. São geralmente utilizados dois microfones cardioides espaçados de alguns centímetros, com um ângulo não nulo entre eles.

Uma fonte sonora central é captada sem diferença de tempo e intensidade, e portanto localizada no centro. Se a fonte sonora se deslocar para a esquerda ou direita, as diferenças de tempo e intensidade vão aumentando progressivamente, e a imagem virtual da fonte desloca-se na mesma direcção.

O ângulo útil de captação aumenta quando se diminui a distância entre as cápsulas ou se diminui o ângulo físico entre os microfones. A compatibilidade monofônica é melhor que no sistema AB, pois as diferenças de fase são atenuadas pelas diferenças de intensidade entre os canais, mas pior que nos sistemas de intensidade (vide 5.2), sobretudo a partir dos 2kHz [15] [4].

Entre as várias opções de ângulos e distâncias entre cápsulas, é muito frequentemente utilizado o sistema ORTF (distância de 17cm e ângulo de 110 graus, como ilustra a figura 5.2, a favor do qual podem ser apresentados os seguintes argumentos:

- Excelente homogeneidade da imagem estereofônica em localização e profundidade
- Ângulo útil de captação de 90°, adaptado à maioria das situações
- Facilidade de utilização

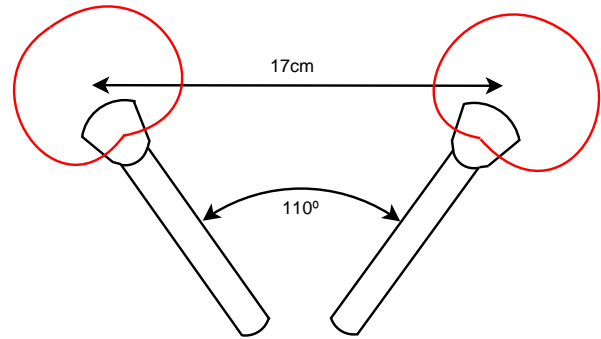


Figura 5.2: Técnica ORTF.

5.1.3 Estereofonia binaural

O posicionamento binaural consiste em gravar directamente o som que entra nos canais do ouvido humano usando microfones miniaturizados. No entanto, recorrer a uma pessoa para realizar este tipo de gravações é pouco prático, naturalmente, até porque exige que a cabeça fique o mais imóvel possível; qualquer movimento irá criar ruído ou distorcer o som captado [15]. A alternativa habitual é utilizar uma cabeça de manequim (*dummy-head*). As gravações binaurais podem funcionar muito bem, sendo especialmente convincentes em reprodução por auscultadores, para a qual são naturalmente vocacionadas; como é natural a imagem estéreo pode degradar-se quando é reproduzida através de altifalantes.

5.2 Técnicas com microfones coincidentes

As técnicas que colocam os microfones de forma coincidente fazem-no para atenuar o problema do cancelamento de fase. Colocando dois microfones adjacentes ou um sobre o outro, apenas se usa IID como parâmetro para criar a noção estéreo, uma vez que não existe diferença temporal. Naturalmente, isto é apontado como desvantagens pelos adeptos das técnicas de microfones espaçados [15].

5.2.1 Técnica XY

Uma das técnicas mais comuns é a configuração XY; usa dois microfones cardioides coincidentes, que formam um ângulo de 90° como ilustra a figura 5.3. As cápsulas devem ter a mesma sensibilidade, directividade e curva de resposta. São colocadas uma sobre a outra, ou lado a lado. Uma fonte sonora colocada na bissetriz do ângulo assim formado será captada com intensidade igual pelos dois microfones e na reprodução será localizada no centro. O

deslocamento da fonte sonora para um ou para outro lado irá provocar uma diferença de intensidade entre os microfones.

A inexistência de diferenças de tempo entre os sinais faz com que a imagem estereofónica seja pobre em espacialização e profundidade. Os elementos sonoros são no entanto bem localizados no espaço sonoro [4].

A compatibilidade monofónica é excelente, devido à inexistência de diferenças de fase entre os dois canais.

Podem também ser usados microfones omnidireccionais com um ângulo de 90° . À primeira vista, esta disposição parece absurda, pois o resultado seria um sinal mono. No entanto, as cápsulas omnidireccionais têm um comportamento direccional nas frequências elevadas (como aliás ficou patente nos ensaios apresentados no capítulo anterior). Este sistema permite, em captação aproximada, beneficiar da extrema linearidade nas frequências graves das cápsulas omnidireccionais sem problemas inerentes ao efeito de proximidade [15].

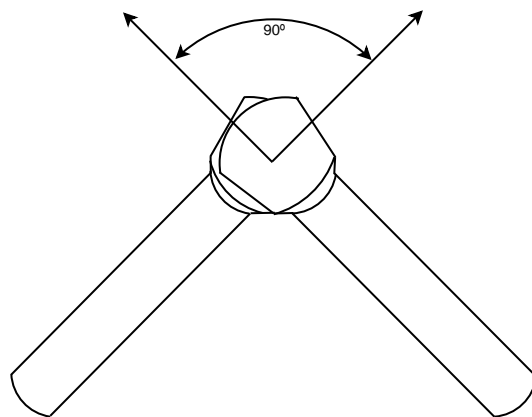


Figura 5.3: Técnica XY.

5.2.2 Técnica Blumlein

Trata-se de um sistema estereofónico de intensidade e de tempo proposto originalmente por Alan Blumlein. Consiste na utilização de dois microfones bidireccionais (figura de 8) com cápsulas alinhadas verticalmente, formando um ângulo físico de 90° (figura 5.4).

Esta disposição tem a vantagem de reproduzir uma imagem estereofónica de nível constante. Ao deslocar uma fonte sonora ao longo de um círculo à volta do microfone, a soma da energia das duas cápsulas permanece constante. No entanto, há que ter em atenção que na zona frontal (315° a 45°), a fonte será captada pelos lobos positivos dos dois microfones bidireccionais, pelo que a imagem da fonte sonora se desloca na direcção correcta. Na zona posterior, (225° a 315°), a fonte sonora será captada pelos lobos negativos, pelo que a imagem da sua localização será invertida. Nas zonas laterais (45° a 135° e 225° a 315°) a fonte sonora será simultaneamente captada pelo lobo positivo de um microfone e pelo lobo negativo do outro, pelo que a imagem da fonte sonora não é localizável. Só há portanto 2 zonas, cada uma de 90° (frontal e posterior) onde o sinal tem coerência de fase. Há que evitar colocar fontes fora destas zonas.

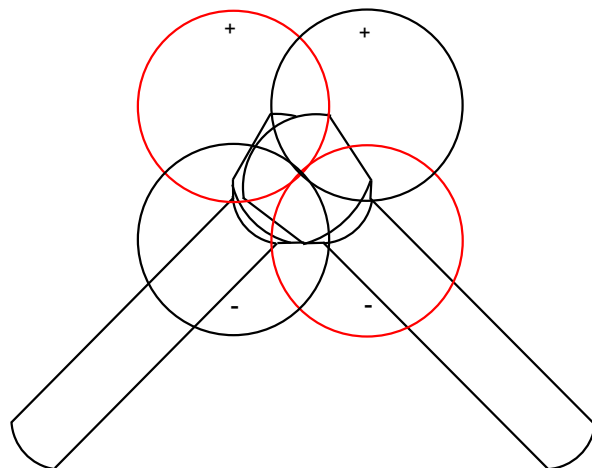


Figura 5.4: Técnica Blumlein.

Visto que a zona posterior é captada em oposição de fase, o efeito obtido é muitas vezes uma ampliação do espaço reverberado. Os microfones bidireccionais sofrem de uma atenuação

progressiva no extremo grave (menos de 200Hz), pelo que não devem ser utilizados para gravar sinais com componentes nessa zona.

O sistema Blumlein deve ser utilizado com precaução, pois exige uma localização rigorosa dos microfones e das fontes sonoras e é particularmente sensível à acústica das salas. No entanto, bem utilizado, pode fornecer resultados excelentes. Tem muito boa compatibilidade mono [15].

5.2.3 Técnica M/S

Este sistema é semelhante ao XY, na medida em que também utiliza duas cápsulas coincidentes (vide figura 5.5). O primeiro microfone, geralmente um cardióide ou hipercardióide, é colocado no eixo da fonte sonora e fornece o sinal M (*Mid*), correspondente à informação monofónica. O segundo microfone, um bidireccional com o lobo positivo orientado para a esquerda, é colocado perpendicularmente ao eixo de simetria do campo sonoro. A membrana capta as informações laterais S (*Side*). Um sistema, que usa uma matriz para calcular o peso de cada microfone, restitui no momento da gravação ou pós-produção, por adição e subtracção, o canal esquerdo (M+S, sinal *Mid* somado com lobo positivo do microfone bidireccional) e o canal direito (M-S, sinal *Mid* menos o lobo negativo do microfone bidireccional).

O efeito de estereofonia é obtido somente por variações de intensidade. A compatibilidade mono é excelente. Uma das principais vantagens do sistema M/S é permitir variar o ângulo útil de captação de som sem intervir mecanicamente no microfone. Basta variar na matriz a relação entre o sinal M e S. Ao aumentar o nível de sinal S, diminui-se o ângulo útil de captação de som.

O sistema M/S é particularmente indicado para captação em cinema e televisão, pois permite ajustar a imagem estereofónica na pós-produção, em função dos planos da imagem. Para além disso, o sinal mono pode ser utilizado separadamente.

O sistema M/S é extremamente versátil. No entanto, o ângulo de captação não pode ser variado com a mesma amplitude de um sistema XY [15].

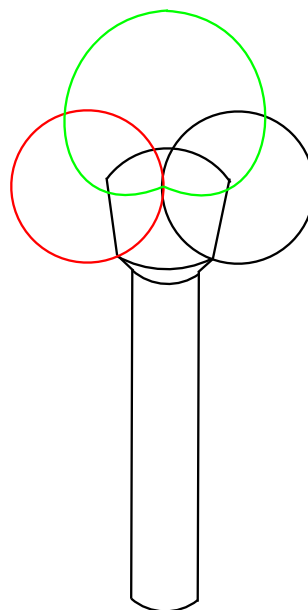


Figura 5.5: Técnica M/S.

5.3 Técnicas multi-microfone

Usando mais que dois microfones numa captação sonora podemos usufruir das vantagens das colocações espaçadas e coincidentes. Obtemos uma variedade grande de diferenças de nível e de tempo, podendo estas ser tratadas posteriormente por *software* e oferecer assim um resultado final de elevada qualidade. O uso de muitos microfones permite captar diversos canais. Usando um sistema *surround* maximizamos as qualidades deste tipo de captação.

Muitos engenheiros de som trabalham actualmente sobre diversas configurações multi-microfone. Esta é uma área extremamente importante sobretudo em captações de música clássica e no cinema, onde cada vez mais se procura criar uma imagem estéreo envolvente e natural, para que o espectador/ouvinte se sinta imerso na acção/concerto [15].

5.4 Ensaio de microfones estéreo

Inicialmente mediram-se três microfones distintos (Studio Project C4, Studio Project LSD2 e AKG C426B)¹, para obter a resposta de cada um para 0° , 45° e 90° .

O microfone Studio Project C4 é um microfone da série C da *Studio Projects*, descrito no manual desta série [20]. Na realidade trata-se de dois microfones geralmente usados para captações estéreo, em técnicas como AB, ORTF e XY. A cápsula deste microfone é substituível, apresentando dois formatos diferentes: omnidireccional e cardióide. Foram medidas estas duas cápsulas para os ângulos enunciados.

O microfone Studio Project LSD2 é também um microfone da série C da *Studio Projects*, apresentando num só corpo as duas cápsulas que permitem a captação estéreo. A direccionalidade das cápsulas pode variar entre três tipos diferentes: omnidireccional, figura de 8 e cardióide. Assim, é possível realizar uma captação estéreo em diversas técnicas com o mesmo microfone. É bastante usado em XY, M/S e *Blumlein*.

O AKG C426B é um microfone semelhante ao LSD2, em que a direccionalidade das cápsulas é seleccionada numa caixa exterior. Possui os mesmos padrões direccionais do microfone LSD2, oferece ainda padrões intermédios. A sua aplicabilidade é semelhante à do microfone anterior.

5.4.1 Microfone Studio Project C4

O microfone C4 apresenta duas cápsulas distintas, omnidireccional e cardióide, que foram medidas separadamente, pelo método da correlação. O microfone encontra-se a 1m da coluna e ambos a 1.4m do solo.

A figura 5.6 ilustra as resposta em frequência da cápsula omnidireccional do microfone C4, enquanto na figura 5.7 temos a resposta em frequência da cápsula cardióide. As respostas em frequência são obtidas por comparação com o microfone Behringer ECM8000 a 0° .

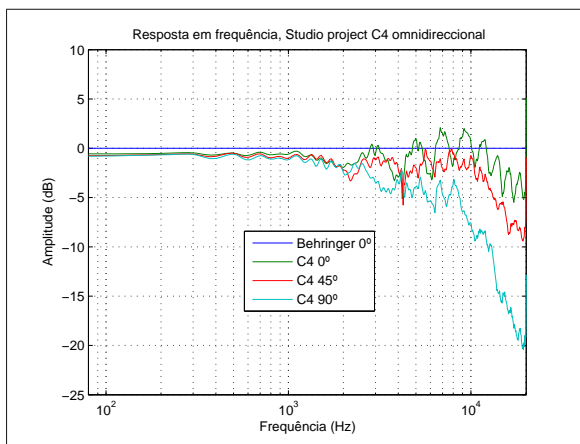


Figura 5.6: Resposta em frequência (C4 - cápsula omnidireccional).

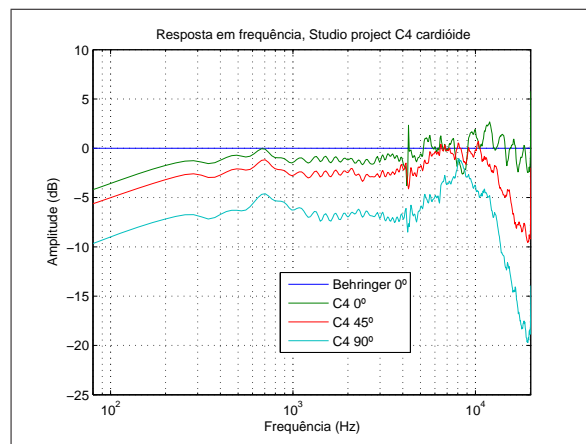


Figura 5.7: Resposta em frequência (C4 - cápsula cardióide.)

Para baixas frequências (até cerca de 4kHz) ambas as resposta são plana como esperado.

¹As *datasheets* dos microfones usados nestas medições encontram-se no Anexo A.

A cápsula com direccionalidade cardióide exhibe uma diferença de amplitude de 5dB entre 0° e 90° . Coerente com os diagramas polares apresentados pelo fabricante para baixas frequências (250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz e 4kHz).

A partir de 4kHz a resposta torna-se bastante irregular. A cápsula omnidireccional perde a sua omnidireccionalidade para altas frequências. Observa-se atenuação próxima de 20dB a 20kHz para captação a 90° . De uma maneira geral cardióide é similar ao omnidireccional a altas frequências. Notam-se apenas ligeiras diferenças, sobretudo em torno de 8kHz.

A frequências elevadas e direcções afastadas da axial (próximo de 90°) o microfone cardióide possui uma resposta em frequência muito irregular, podendo introduzir colorações numa gravação. O próprio microfone omnidireccional não responde uniformemente em toda a gama audível.

5.4.2 Microfone Studio Project LSD2

Mediram-se individualmente as duas cápsulas do microfone LSD2, ambas no formato cardióide, para os ângulos enunciados. Manteve-se o posicionamento do ensaio anterior ($d=1m$ e $h=1.4m$). As respostas no tempo medidas a três ângulos apresentam-se, sobrepostas, na figura 5.8. É bem visível a diminuição da amplitude à medida que nos afastamos da direcção axial.

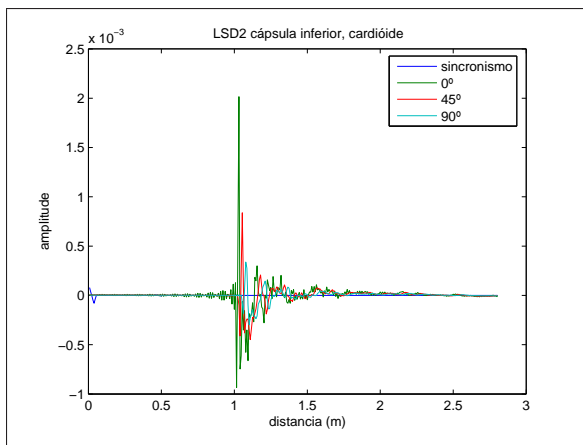


Figura 5.8: Resposta no tempo (LSD2 - cápsula inferior).

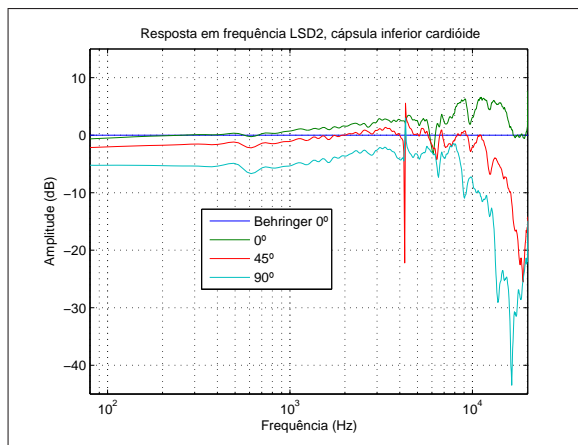


Figura 5.9: Resposta em frequência (LSD2 - cápsula inferior).

Para a cápsula superior os resultados são muito semelhantes, quer no tempo quer em frequência. Tal como temos verificado em todos os microfones medidos, a resposta axial em frequência é relativamente plana, assim como para qualquer direcção desde as baixas frequências. Aumentando a frequência e afastando de 0° o ângulo de captação a resposta diverge, apresentando um formato muito irregular. A variação da amplitude com a orientação é a esperada dada a direccionalidade cardióide.

5.4.3 Microfone AKG C426B

O microfone AKG C426B é semelhante ao anterior. Fizeram-se também medições individuais de cada cápsula, no formato cardióide, para 0° , 45° e 90° . As condições de medição

são iguais às dos microfones anteriores. Novamente, apenas se apresentam os resultados da cápsula inferior (figuras 5.10 e 5.11) pois a cápsula superior possui respostas idênticas.

Em frequência, as respostas estão de acordo com o esperado: são planas até cerca de 4kHz, depois irregulares à medida que se aproximam de 20kHz. A resposta axial apresenta irregularidades mas não difere muito em amplitude; situa-se em torno de 2dB, para a gama de frequências estudada. Embora apresente picos negativos e positivos, estes nunca atingem a amplitude dos picos presentes nas respostas para os outros ângulos.

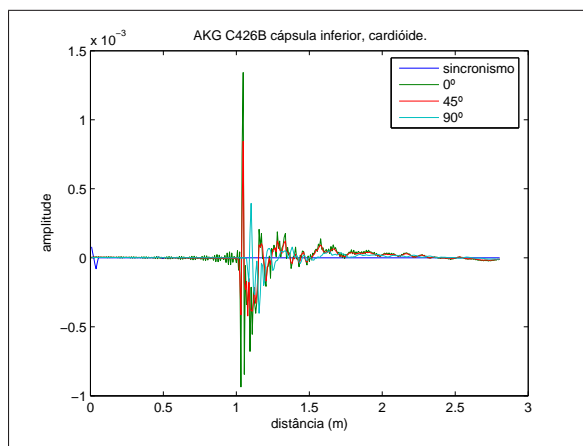


Figura 5.10: Resposta no tempo, AKG C426B, cápsula inferior.

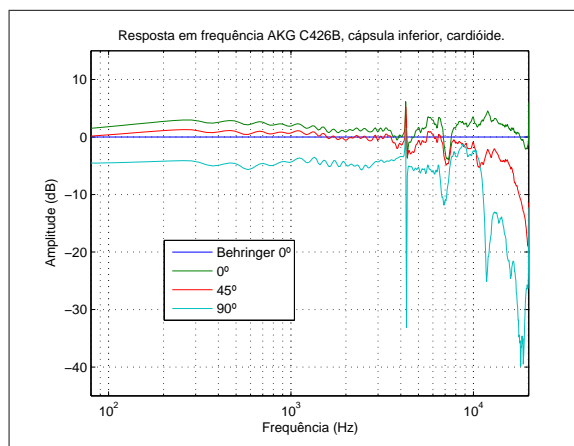


Figura 5.11: Resposta em frequência, AKG C426B, cápsula inferior.

Um facto que importa voltar a justificar é o pico a pouco mais de 4kHz; está presente em todas as respostas e deve-se ao *crossover* da coluna; aparentemente a sensibilidade e o ângulo de captação do microfone influenciam o seu impacto na resposta. Para além deste ponto, a resposta em frequência não apresenta significativas discontinuidades.

A medição individual das cápsulas apresenta resultados esperados. A resposta axial não apresenta grandes variações, mas para ângulos próximos de 0° existem colorações, isto é, o microfone não capta uniformemente todas as frequências. É neste ponto que peca a informação normalmente fornecida pelos fabricantes, pois, por vezes, os diagramas polares dão uma ideia superficial da resposta em frequência, fazendo transparecer que ela decresce linearmente com a frequência, o que nem sempre acontece. De facto, existem muitas vezes alguns *lóbulos*, que podem introduzir coloração se o sinal captado possuir parte significativa do seu espectro nas altas frequências e o posicionamento do microfone não o evitar.

5.5 Avaliação de técnicas estéreo

Após a medição individual de cada cápsula dos microfones, medimos as duas cápsulas posicionadas como se se tratasse de uma verdadeira captação estéreo. As medições foram realizadas nos mesmos moldes das anteriores (o mesmo posicionamento dos transdutores e também o mesmo equipamento utilizado). Como o sinal de sincronismo ocupa um canal, não podemos medir as duas cápsulas simultaneamente. A solução encontrada foi continuar a medir cada cápsula individualmente, com o cuidado de nunca alterar o posicionamento

dos microfones (ou qualquer outro parâmetro), entre a medição do microfone esquerdo e do direito.

5.5.1 Técnica AB

A figura 5.12 mostra a montagem utilizada para a medição desta técnica. Notem-se os dois microfones colocados num suporte próprio para esta configuração (paralelos entre si). A distância entre microfones foi 12.5cm.



Figura 5.12: Técnica AB.

Neste caso justifica-se a apresentação das várias respostas no tempo (figuras 5.13, 5.14 e 5.15), para que seja possível visualizar a diferença temporal entre os microfones esquerdo e direito, característica deste tipo de captação.

Podemos facilmente comprovar a distância entre microfones. Usando a função *max* do Matlab, encontrámos o índice a que corresponde o máximo de cada uma das respostas, convertendo depois a diferença de amostras em distância. Alternativamente, poderia usar-se a função de correlação.

A tabela 5.1 apresenta as distâncias assim calculadas. A distância de 1.56cm a 0° indica que o posicionamento dos microfones não foi absolutamente rigoroso, o que é natural pois é difícil garantir manualmente o alinhamento do eixo sonoro.

Para 90° , a distância corresponde exactamente ao valor esperado.

As respostas em frequência comparada com o Behringer a 0° apresentam-se nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18.

As respostas axiais dos microfones esquerdo e direito deveriam ser muito semelhantes mas existem diferenças visíveis. Tal parece indicar que os microfones não se encontravam exactamente a 0° , mas sim ligeiramente deslocados, pois a resposta de um deles apresenta em geral uma maior amplitude.

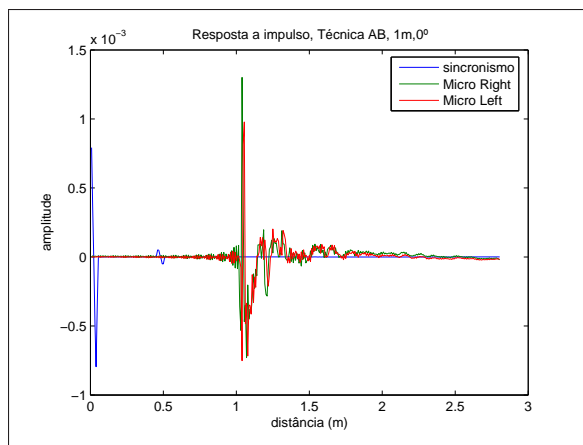


Figura 5.13: Resposta no tempo, técnica AB, 0°.

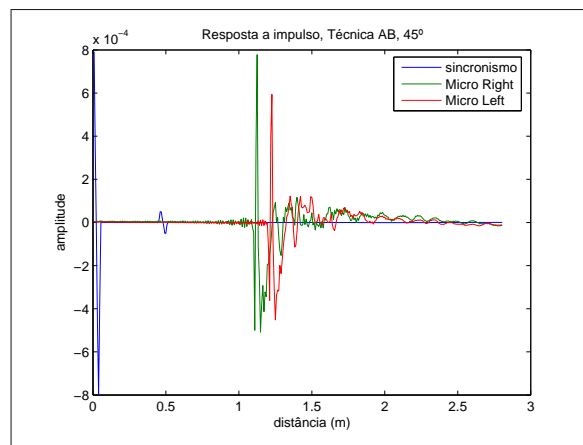


Figura 5.14: Resposta no tempo, técnica AB, 45°.

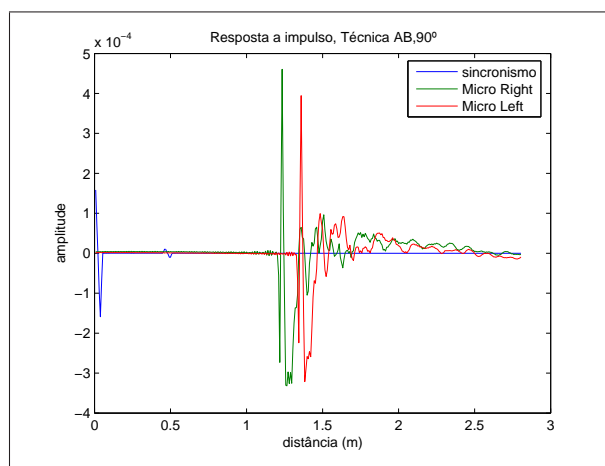


Figura 5.15: Resposta no tempo, técnica AB, 90°.

Tabela 5.1: Posição e distância entre microfones na técnica AB.

ângulo	distância (m)
0°	0.0156
45°	0.1016
90°	0.1250

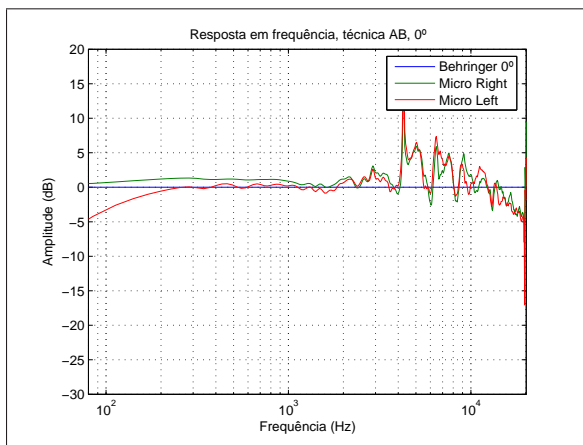


Figura 5.16: Resposta em frequência, técnica AB, 0° .

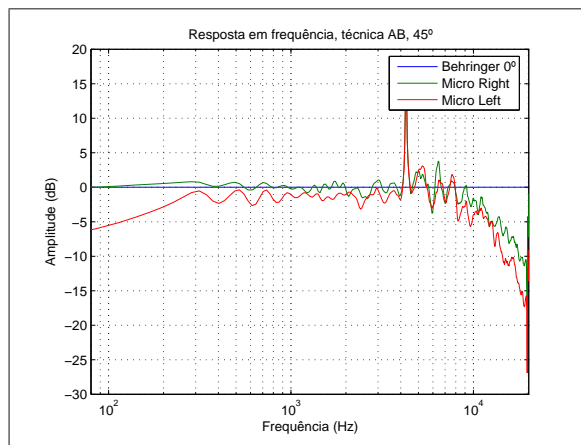


Figura 5.17: Resposta em frequência, técnica AB, 45° .

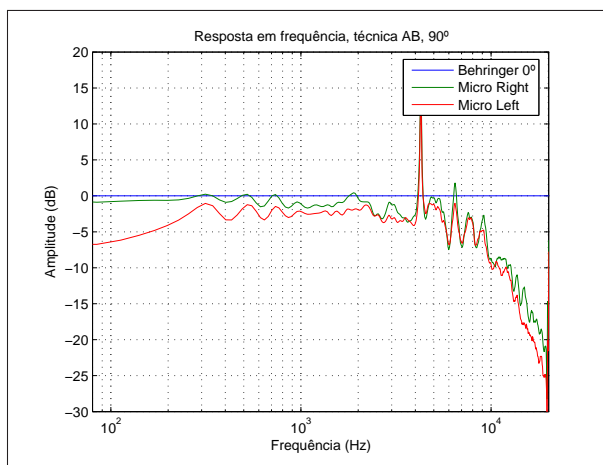


Figura 5.18: Resposta em frequência, técnica AB, 90° .

Os resultados vão de encontro ao esperado face à análise cápsula a cápsula realizada anteriormente. A baixas frequências, a resposta é relativamente plana, enquanto para frequências mais elevadas se torna bastante irregular. Os picos a 4kHz já foram explicados: estão relacionados com o filtro de *crossover* da coluna. À medida que o ângulo de orientação se afasta de 0° , os microfones apresentam uma atenuação crescente na zona de altas frequências.

A diferença de amplitude entre as duas respostas tem uma contribuição modesta para o efeito estéreo nesta técnica; o principal papel é desempenhado pelo desfaseamento temporal entre canais. Este desfaseamento devido à distância entre microfones pode ser crítico. Pode provocar efeitos indesejados, sobretudo na conversão do sinal estéreo para mono (por da soma dos dois canais), como se encontra amplamente explicado na literatura [15].

Efectuou-se um teste para demonstrar os potenciais efeitos indesejados desta técnica. Simulou-se a conversão de um sinal estéreo num sinal mono, através da soma dos dois canais. O sinal esperado deveria possuir uma resposta em frequência igual à soma das duas respostas em frequência dos dois canais.

Na figura 5.19 temos a resposta no tempo do sinal resultante. A figura 5.20 (resposta em frequência) evidencia os artefactos introduzidos.

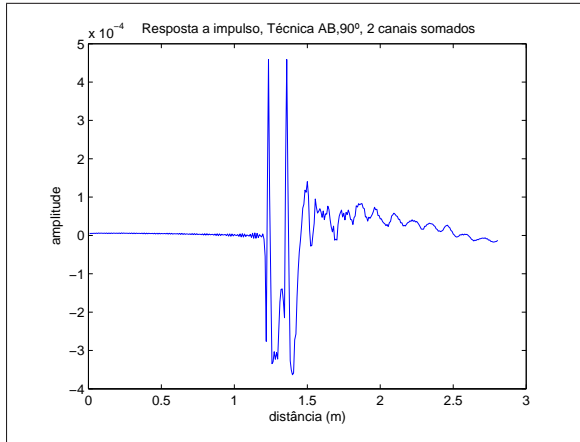


Figura 5.19: RI - conversão mono, técnica AB, 90°.

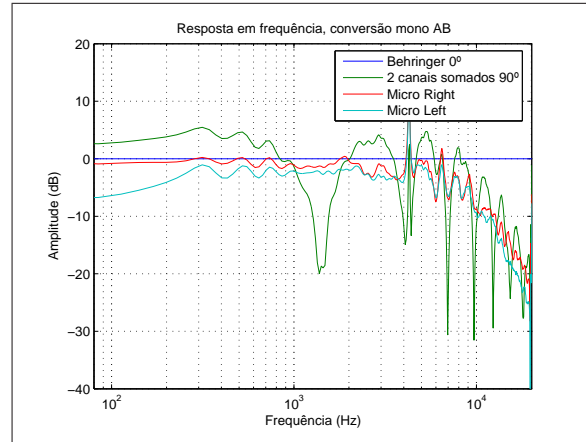


Figura 5.20: Resposta em frequência, conversão mono, técnica AB.

A resposta em frequência apresenta picos negativos muito acentuados. Este fenómeno é explicado pelo cancelamento de componentes de frequência que se apresentam nos dois microfones em oposição de fase (sendo d a distância entre os microfones segundo o eixo de propagação, isto acontece para $f = \frac{c}{2d}$ e seus harmónicos). Se o microfone e a fonte se mantiverem sempre na mesma posição, este efeito não é muito perceptível ao ouvinte. Contudo, se a fonte sonora se deslocar, os picos também se deslocam para outras frequências; este efeito é audível e pode comprometer uma gravação com esta técnica.

5.5.2 Técnica XY

Como esta técnica usa cápsulas coincidentes, o problema inerente à diferença de fase não se coloca. O efeito estéreo é conseguido pela diferença de amplitude entre os sinais que cada microfone capta. É óbvio que as duas cápsulas deverão ter a mesma sensibilidade, diagrama de radiação e resposta em frequência, para que a espacialização seja introduzida de forma correcta, pois se as suas características não forem muito semelhantes a imagem estéreo criada pode ser errada.

Mediu-se o microfone AKG C426B a 0° e 45° , com esta configuração. Os resultados vão de encontro ao esperado. No tempo, as respostas a 0° são muito semelhantes (figura 5.21), enquanto a 45° diferem bastante em amplitude (figura 5.22).

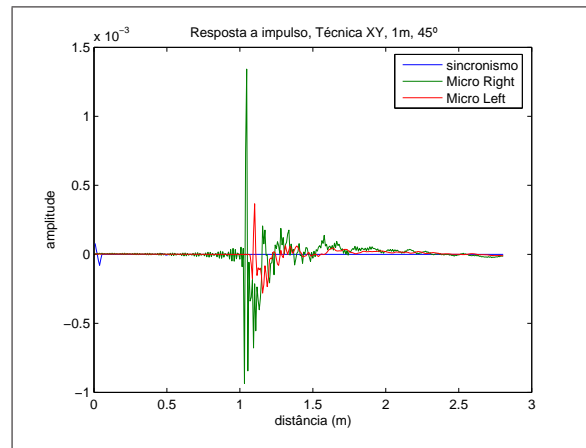
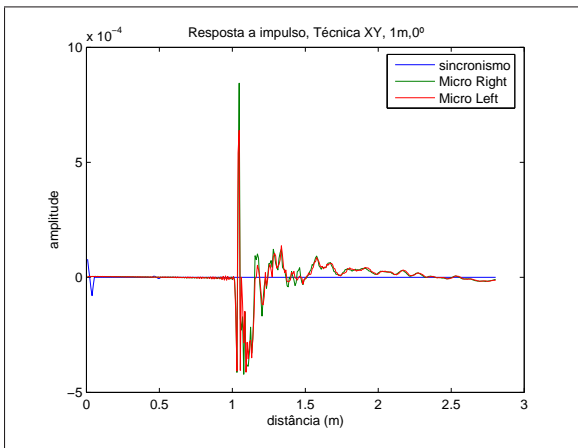


Figura 5.21: Resposta no tempo, técnica XY, AKG, 0° .

Figura 5.22: Resposta no tempo, técnica XY, AKG, 45° .

A resposta em frequência revela que na captação a 0° os dois microfones possuem uma resposta muito similar, sobretudo a baixas frequências (figura 5.23). Um problema esperado nesta técnica consiste na resposta a altas frequências poder ser muito atenuada nos dois microfones, pois ângulo entre eles e o eixo sonoro é de 45° . Na captação a 45° (figura 5.24) um microfone que capta como se se encontrasse a 0° , enquanto o outro está efectivamente a 90° , o que implica uma atenuação significativa derivada da sua direccionalidade cardióide. O microfone a 0° apresenta uma resposta bastante plana em toda a sua gama de captação, mas no microfone a 45° observa-se um já esperado efeito de atenuação às frequências elevadas.

Podemos inferir destes resultados que um potencial problema associado à técnica XY é a falta de agudos para uma captação frontal. A resposta do microfone não é plana, para ângulos afastados de 0° , sendo este um problema que não pode ser ignorado. Pode-se argumentar que esta técnica é excelente numa captação a 0° , pois apesar de cardióides os diagramas podem somar-se, produzindo assim uma boa imagem sonora frontal. Contudo, não se pode desprezar a coloração a altas frequências.

Para provar que de facto não se verifica o fenómeno de cancelamento por oposição de fase manifestado pela técnica AB repetiu-se o teste descrito na secção anterior. O resultado é apresentado na figura 5.25. Não se encontram os artefactos introduzidos pela soma das respostas, tal como seria esperado, pois não existe o desfasamento entre canais presente na técnica AB.

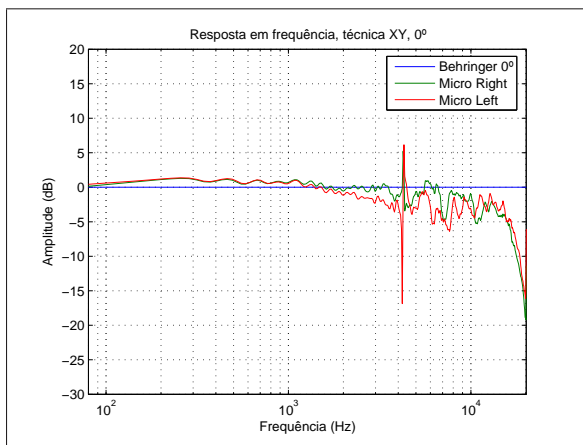


Figura 5.23: Resposta em frequência, técnica XY, AKG, 0°.

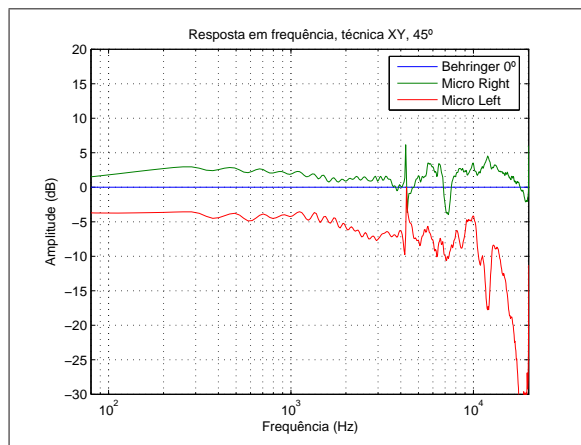


Figura 5.24: Resposta em frequência, técnica XY, AKG, 45°.

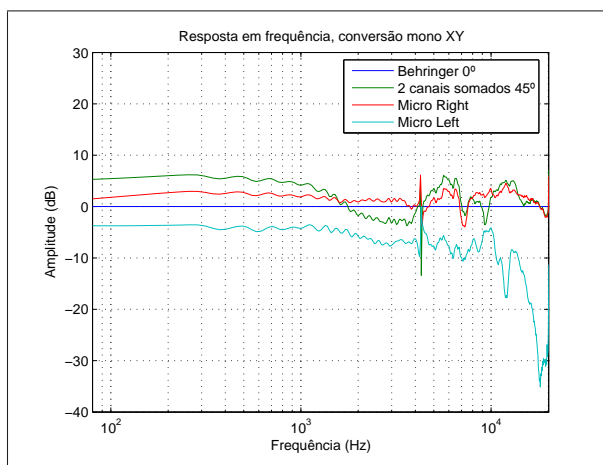


Figura 5.25: Resposta em frequência da conversão mono, técnica XY.

5.5.3 Técnica M/S

A técnica M/S necessita de um pós-processamento; assim, mediram-se as respostas de cada uma das cápsulas dos microfones (cardióide e figura de 8) para cada um dos ângulos e posteriormente calcularam-se os canais esquerdo e direito. O sinal do canal esquerdo consiste na soma da resposta do cardióide com a do figura de 8 e o direito na subtração. Na realidade, os técnicos de som muitas vezes não fazem uma abordagem tão linear no processamento desta técnica; é frequente usarem uma matriz onde podem variar o peso de cada microfone, podendo assim manipular o sinal pós-gravação da forma que desejem.

Studio Project LSD2

Com o microfone LSD2 mediram-se as respostas nesta configuração.

No tempo (figuras 5.26, 5.27 e 5.28) vemos que para 0° as respostas dos dois canais são muito semelhantes. O microfone figura de 8 encontra-se perpendicular à fonte sonora, o que

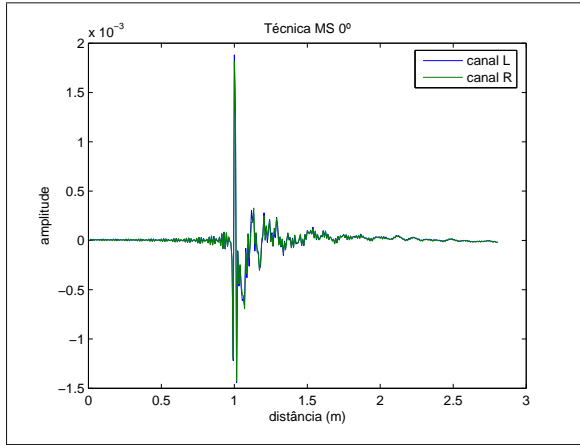


Figura 5.26: Resposta no tempo, técnica M/S, LSD2, 0°.

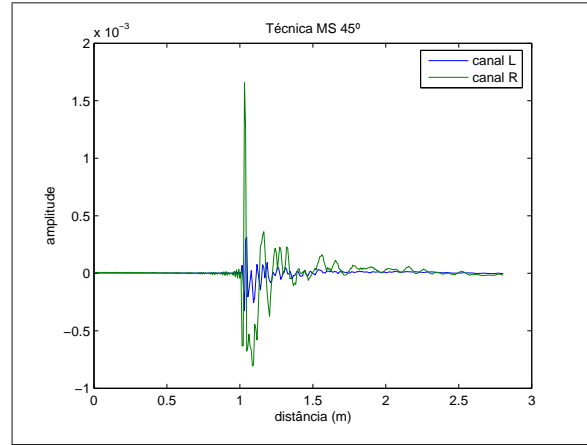


Figura 5.27: Resposta no tempo, técnica M/S, LSD2, 45°.

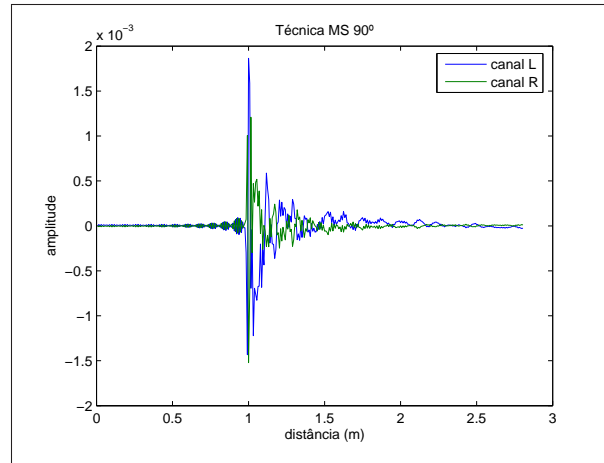


Figura 5.28: Resposta no tempo, técnica M/S, LSD2, 90°.

leva a que a sua resposta seja praticamente nula quando comparada com a resposta axial do cardióide. Neste posicionamento, o microfone figura de 8 não tem qualquer efeito na captação.

Para 45°, as duas respostas são da mesma ordem de grandeza em amplitude. O microfone figura de 8 assemelha-se a duas cápsulas omnidireccionais, portanto, apesar de oblíqua, a cápsula figura de 8 capta o sinal com alguma amplitude. O cardióide nesta posição apresenta alguma atenuação, mas continua a ser significativa a sua resposta. O resultado do processamento produz respostas no tempo muito díspares, onde o canal direito possui muito maior amplitude que o esquerdo, como seria de esperar.

A 90° teremos o microfone figura de 8 num posicionamento axial (0°) e o cardióide perpendicular. Neste caso a maior contribuição para a captação provém do microfone figura de 8. O pós-processamento pode levar a que a diferença entre canais não seja significativa, pois a resposta do cardióide tem menor amplitude que a do figura de 8.

As respostas em frequência encontram-se nas figuras 5.29, 5.30 e 5.31. A 0°, ângulo em que o microfone cardióide tem contribuição maioritária, esta técnica apresenta uma resposta

bastante plana. Assim, o ouvinte escuta de igual forma o som nos dois canais, ficando com a sensação que este provém da sua frente.

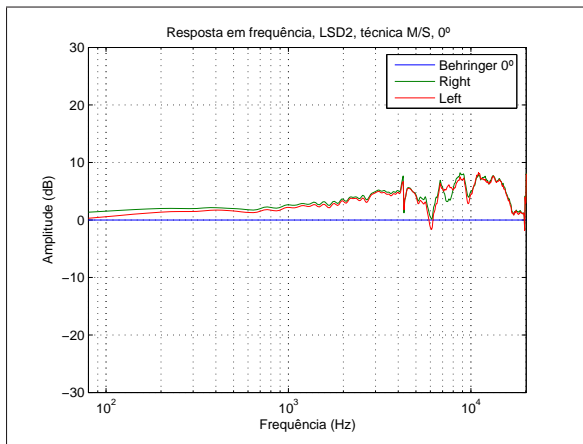


Figura 5.29: Resposta em frequência, técnica M/S, LSD2, 0°.

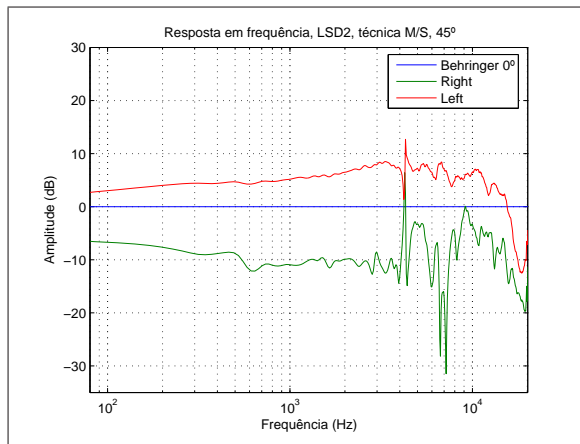


Figura 5.30: Resposta em frequência, técnica M/S, LSD2, 45°.

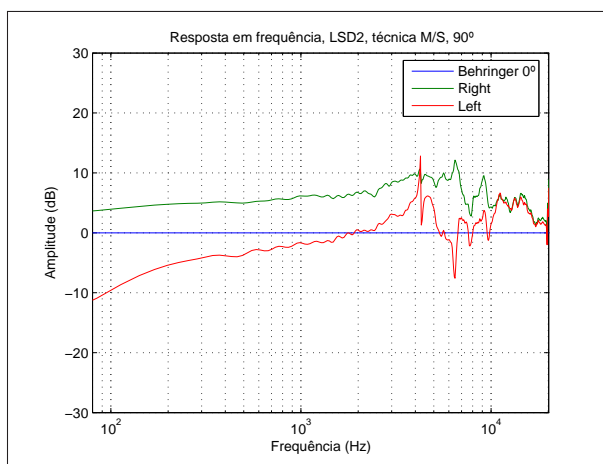


Figura 5.31: Resposta em frequência, técnica M/S, LSD2, 90°.

A 45°, as respostas diferem muito entre canais. A altas frequências, o sinal é atenuado nos dois canais, fenómeno derivado da captação oblíqua dos dois microfones. Esta deverá ser a posição mais crítica desta técnica de captação, pois nenhum dos microfones se encontra a 0° em relação à fonte, podendo assim ser introduzidas colorações.

A 90° verifica-se um fenómeno curioso: a baixas frequências, as respostas diferem muito em amplitude, enquanto a altas frequências são muito semelhantes. Tal poderá ser explicado pela captação axial do microfone figura de 8.

AKG C426B

Além do microfone LSD2, também se mediu o AKG C426B configurado na técnica M/S. O procedimento foi idêntico ao seguido para o LSD2. Os resultados são muito semelhantes;

por esse motivo apenas é apresentada a resposta axial, no tempo e em frequência (figura 5.32 e figura 5.33) respectivamente. A diferença entre os dois microfones é ligeira, contudo o AKG apresenta uma pequena atenuação às altas frequências, mesmo a 0° .

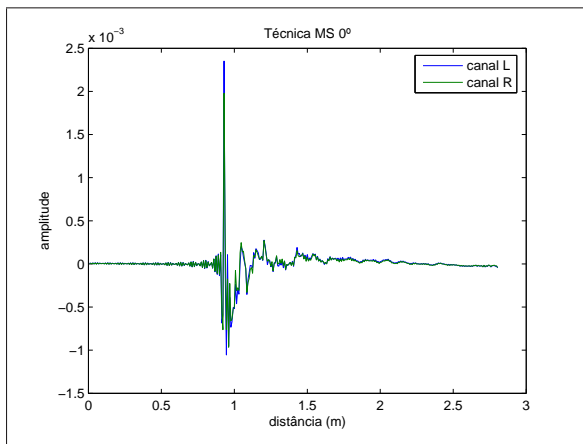


Figura 5.32: Resposta no tempo, técnica M/S, AKG C426B, 0° .

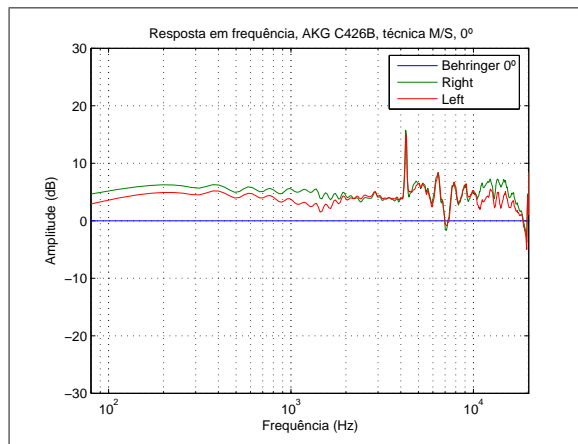


Figura 5.33: Resposta em frequência, técnica M/S, AKG C426B, 0° .

5.5.4 Apreciação dos resultados

A medição de diferentes técnicas de gravação estéreo levou a resultados onde confirmámos os potenciais problemas inerentes a cada uma delas.

A técnica AB, além de outros inconvenientes, é imprópria para posterior conversão estéreo para mono. Captações oblíquas são também fonte de colorações pois a altas frequências existe uma forte atenuação do sinal, devida às respostas dos microfones.

Usando a técnica XY, elimina-se o problema inerente ao espaçamento entre os microfones. Contudo, a 0° os microfones encontram-se ambos oblíquos ao eixo sonoro, introduzindo por isso atenuação a altas frequências. Este é um facto importante, e a não desprezar sobretudo se o sinal captado tiver componentes significativas nesta região.

A técnica M/S apresenta uma resposta bastante plana para ângulos próximos de 0° e de 90° , apresentando problemas apenas para ângulos intermédios. Contudo, é uma solução técnica interessante, pois o microfone cardióide assegura uma excelente captação a 0° , enquanto o figura de 8 capta o som lateralmente. Para ângulos intermédios, o pós-processamento pode ser muito útil para criar os efeitos desejados.

A diferença entre os microfones ensaiados (LSD2 e AKG C426B) não é significativa. Poderá haver alguma diferença na sensibilidade, mas as respostas a baixas frequências são igualmente planas. A amplitude dos *lóbulos* na região de altas frequências observados a 0° não deverá ser significativa para introduzir artefactos.

A técnica a usar para uma captação estéreo deverá ser cuidadosamente escolhida, tendo sempre em consideração que não existe o microfone ideal, com uma resposta realmente plana qualquer que seja o ângulo ou a frequência. Uma captação estéreo de qualidade exige conjugação adequada de vários factores: microfones, técnica estéreo - posicionamento, ambiente sonoro e acústico.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

A análise do modelo do pistão circular plano apresentada no capítulo 2 revela um padrão comum a todos os microfones medidos: para frequências elevadas e ângulos afastados da direcção axial, a resposta é atenuada. Em microfones de elevada qualidade, esta atenuação pode ser ligeira; contudo, mesmo os microfones considerados omnidireccionais a exibem. Preparou-se uma demonstração para auralizar estes efeitos, efectuando a convolução de um sinal anecóico (flauta tenor) com as respostas do modelo do pistão e fazendo variar virtualmente, de uma forma programada, a sua orientação em relação à fonte sonora. Os resultados desta demonstração corresponderam inteiramente ao esperado: verifica-se uma atenuação do sinal para ângulos próximos de 90° .

A pesquisa efectuada mostrou que a medição rigorosa de microfones não é uma tarefa trivial. Coloca-se o problema de separar a resposta do microfone da dos restantes elementos inevitavelmente presentes na cadeia de medida, nomeadamente a sala. A partir do estudo dos métodos comumente usados para medir a resposta impulsional de sistemas LTI formulou-se um sistema para medir microfones, baseado no método da correlação. Usou-se o Matlab, pois este, além de inúmeras funções matemáticas úteis para as operações de processamento de sinal requeridas, possui as ferramentas adequadas, nomeadamente, para geração, reprodução e gravação de sinais áudio (suportando os formatos mais comuns) e apresentação gráfica de resultados.

Elaboraram-se algumas funções específicas para este projecto, no sentido de medir as respostas de microfones de forma sistemática. Refiram-se, por exemplo, a função *impcorr.m*, para calcular a correlação entre dois sinais de forma eficiente (no domínio da frequência) e a rotina *manualfft.m*, que implementa o cálculo da DTFT a partir da definição matemática.

A eliminação da influência da sala pode ser conseguida recorrendo a uma câmara anecóica ou estabelecendo condições *quasi*-anecóicas. Os resultados obtidos na câmara anecóica do DETI revelaram artefactos que parecem indicar que ela não se comporta de forma realmente anecóica na gama de frequências de áudio. Recorreu-se então ao estabelecimento de condições *quasi*-anecóicas num laboratório do DETI.

Nestas condições, encetaram-se então ensaios de medição prática da resposta impulsional de um conjunto de microfones de vários tipos, usando o sistema desenvolvido. Sempre que possível, foram comparados os resultados com os dados fornecidos pelos fabricantes, no sentido de validar o sistema e metodologia empregues. Destaca-se o exemplo do microfone Shure Prologue 10L - vide gráficos da figura 4.19).

Debruçando-se este trabalho sobre o posicionamento de microfones, faz todo o sentido

que sejam avaliados microfones e técnicas de captação estéreo. Existem inúmeras técnicas estéreo e pouco consenso sobre qual a mais indicada para uma determinada captação. Apesar de documentação abundante sobre os efeitos e das capacidades de cada técnica, não se encontram facilmente resultados da medição de microfones reais. Para procurar escrutinar de forma objectiva algumas das técnicas mais usuais, utilizou-se o sistema criado para medir individualmente as cápsulas e também o seu desempenho em cada configuração. Os resultados mostraram-se interessantes, e em alguns casos muito elucidativos das vantagens e inconvenientes de cada técnica e dos potenciais artefactos introduzidos (vide, por exemplo, o estudo, apresentado na secção 5.5.1, relativo à conversão estéreo-mono de uma captação obtida com a técnica AB, que evidencia claramente artefactos de *comb filtering*).

Com estes resultados validou-se o sistema de medição e o método utilizado (método da correlação). Como produto final fica uma aplicação em Matlab, acompanhada de um manual de utilização.

Como trabalho futuro será interessante construir uma aplicação em tempo real, para simulação da movimentação de um microfone, onde o utilizador possa acompanhar auditivamente o efeito da variação do ângulo de captação e detectar ‘maus’ ângulos de captação. Poderia utilizar-se o modelo do pistão, ou mesmo medir microfones e trabalhar com respostas reais. Poderá recorrer-se à biblioteca áudio Portaudio [19], para processamento de áudio em tempo real. Como se trata de uma biblioteca *open-source*, permite que programas que a utilizam possam ser executados em diferentes plataformas e sistemas operativos. Para facilitar a sua portabilidade está escrita em linguagem C. Permite ao utilizador criar qualquer tipo de aplicação cuja finalidade seja a manipulação de ficheiros áudio.

Uma outra sugestão é o aperfeiçoamento da interface de medição. Talvez fosse interessante programá-la em outra linguagem, para evitar a necessidade de licença de utilização do Matlab. Como esta interface é um trabalho recente, necessita ainda de alguns melhoramentos, e também testes de validação do seu correcto funcionamento. Sugere-se desde já que seja alterada no sentido de possibilitar a selecção da gama de frequências do sinal de teste, e a apresentação de resultados com a compensação da cadeia de medida (seria interessante poder escolher o microfone de referência, com dados previamente armazenados).

Apêndice A

Scripts

Neste capítulo de anexos são enumerados numa tabela os *m-files* e quaisquer outros ficheiros elaborados ao longo desta dissertação, que façam parte deste trabalho e de alguma forma tenham relevância. A negrito temos o nome da pasta onde está o ficheiro descrito.

Todos os ficheiros e pastas se encontram no *cd* que acompanha a dissertação. Também os *datasheet* dos microfones medidos se encontram nesse mesmo *cd*, na pasta *microfones_datasheet*.

Tabela A.1: Ficheiros e respectiva descrição.

Nome do ficheiro	Descrição
	capitulosimulacao
<i>mod_pistaovrespfreq.m</i>	Simulação do pistão, resposta em frequência, figura 2.2.
<i>mod_pistaovrespang.m</i>	Simulação do pistão, resultado na forma de gráficos polares, figura 2.3.
<i>mod_pistao_graficopoli.m</i>	Simulação do pistão, resultado em função da frequência e de θ , figura 2.4
<i>teste.m</i>	Função que gera uma sinusóide, argumentos: frequência e duração (seg).
	capitulosimulacao2
<i>factor_dir.m</i>	Função que calcula o factor direccional, para o modelo do pistão.
<i>interpol.m</i>	Função que realiza interpolação entre dois blocos de sinal.
<i>simMPsemInter.m</i>	Exemplo da figura 2.6, sinusóide sem interpolação.
<i>simMPcomInter.m</i>	Exemplo da figura 2.10, sinusóide com interpolação.
	capitulosimulacao_demo
<i>simVersDemo.m</i>	Demo do processamento de um sinal áudio com a resposta do pistão.
	ficheirosDeMedicao
<i>logchirp.m</i>	Gera um chirp logarítmico, num intervalo de frequências pretendido
<i>filt_inv.m</i>	Cálculo do filtro inverso do <i>chirp</i> logarítmico.
<i>gerarlog.m</i>	Gera um ficheiro de texto com dados da medição.
<i>impcorr.m</i>	Cálculo da resposta de um sistema.
<i>impresponse.m</i>	<i>Script</i> que utiliza todas as funções criadas para medir respostas.
<i>manualfft.m</i>	Cálculo da <i>fft</i> a partir da definição matemática.

	testechirp
<i>testechirp.m</i>	Testes à autocorrelação do <i>chirp</i> .
	Resultados317Behringer
<i>testebhringer.m</i>	Resultados para o microfone Behringer ECM8000.
<i>testedistancias.m</i>	Resultados do Behringer ECM8000 para várias distâncias.
	Resultados317Sennheiser
<i>testessennheiser.m</i>	Resultados da medição do Sennheiser 541.
	Resultados317Shure
<i>testeshure.m</i>	Resultados da medição do Shure Prologue 10L.
	ResultadosAnecoicos
<i>testeanecoico.m</i>	Resultados da medição na sala anecóica (Behringer).
	Medicoes28Maio
<i>testeC4.m</i>	Resultados da medição, microfone C4.
<i>capsulasLSD2AKG.m</i>	Resultados da medição, LSD2 e AKG C426B.
<i>testeAB.m</i>	Resultados obtidos na medição da técnica AB.
<i>XYtestAKG.m</i>	Resultados da técnica XY com o AKG C426B.
<i>MSLSD2.m</i>	Resultados da técnica M/S com o LSD2.
<i>MSLSD2.m</i>	Resultados das figuras 3.14 e 3.15.
<i>MSAKG.m</i>	Resultados da técnica M/S com o AKG C426B.

Apêndice B

MATLAB

O Matlab (MATrix LABoratory) é um *software* originalmente concebido para simplificar a implementação de rotinas de álgebra linear. Desenvolvido pela *MathWorks* foi melhorado e tornou-se numa ferramenta muito útil para implementar algoritmos numéricos para uma ampla gama de aplicações. Permite manipular matrizes, gerar gráficos, implementar algoritmos, criar interfaces para utilizadores e interface com programas escritos noutras linguagens, incluindo C, C++ e Fortran.

Actualmente o MATLAB dispõe de uma biblioteca bastante abrangente de funções matemáticas, criação de gráficos e manipulação de dados que auxiliam muito o trabalho do programador. Possui também uma vasta colecção de bibliotecas denominadas *toolboxes* para áreas específicas como: equações diferenciais ordinárias, controlo, estatística, processamento de imagens, processamento de sinais, finanças.

A linguagem e o ambiente de programação Matlab permitem ainda que o utilizador possa escrever as suas próprias bibliotecas. Assim, o utilizador pode enriquecer a linguagem, incorporando novas funções.

Por possuir muitas rotinas já implementadas, por exemplo *fft*, torna-se uma forma rápida e simples para uma primeira abordagem a um problema. É uma ferramenta muito útil para análise algébrica de problemas, mas também para processamento de sinal.

Neste trabalho foi muito útil uma toolbox em particular, a *data acquisition*. Com esta conseguiu-se medir de forma rigorosa respostas de microfones. Utilizaram-se várias ferramentas do Matlab para se chegar aos resultados pretendidos. Criou-se algumas novas rotinas para enriquecer o nosso trabalho (salienta-se a *impcorr*), e que podem ser usadas futuramente por quem necessite efectuar testes idênticos aos realizados.

Apêndice C

Data acquisition toolbox

A *data acquisition toolbox* permite-nos enviar e/ou adquirir um sinal usando para tal um simples script m-file. Consiste num conjunto de funções e MEX-files construídos usando as funcionalidades do Matlab.

Para visualizar todas as funções e demos da toolbox podemos usar: *help daq*.

Para ver o código de uma qualquer função da toolbox: *type functionName*.

A toolbox é constituída por 3 componentes:

M-files: Criar o objecto para aquisição ou envio de dados, configurar os valores das propriedades e avaliar o estado e os recursos da aquisição.

Engine: Armazena os objetos e os valores das suas propriedades. Controla o armazenamento de dados adquiridos em fila de espera e controla a sincronização dos eventos.

Adaptors: Faz a interligação entre o hardware e a *engine*, ao nível das propriedades, dos dados e eventos.

Na Figura C.1 podemos observar um esquema de interligação dos componentes com o restante sistema.

Uma sessão de aquisição de dados é constituída pelos seguintes cinco passos:

- Criação de um objecto (*device*);
- Adicionar ao objecto os canais ou linhas pretendidas;
- Configuração dos valores e propriedades para controlo do comportamento da aplicação de aquisição de dados;
- Adquirir dados (*ai*) ou enviar dados (*ao*);
- Limpar *ai* e/ou *ao*;

Criação de um objecto

As funções criadas são nomeadas para o objecto criado, tal é visível na tabela C.1.

ID é o identificador do dispositivo de hardware, é opcional para placas de som cujo o ID é 0. *Adaptor* é o nome do driver, os formatos suportados pela *acquisition toolbox* são os enunciados na tabela C.2.

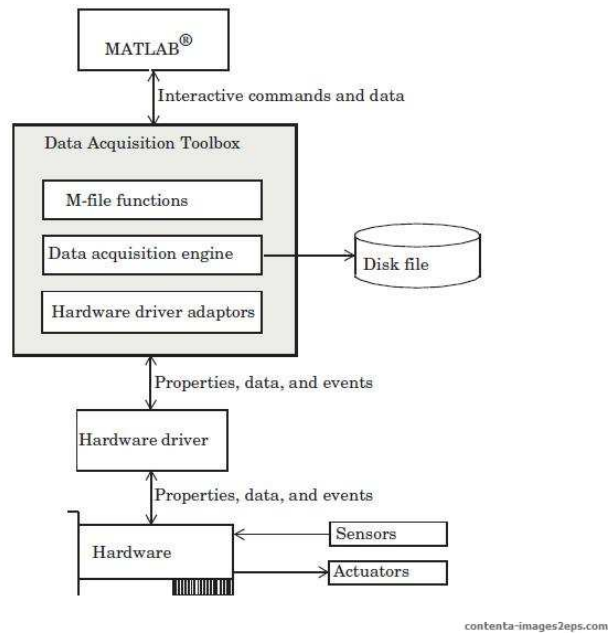


Figura C.1: Componentes que constituem a toolbox *data acquisition*.

Tabela C.1: Funções para criação de objectos.

Tipo de subsistema	Função
Analog input	<code>analoginput('adaptor',ID);</code>
Analog output	<code>analogoutput('adaptor',ID);;</code>
Digital I/O	<code>digitalio('adaptor',ID);</code>

Por exemplo, para criar um objecto de uma entrada analógica *ai* para a placa de som:

```
ai = analoginput('winsound');
```

Adicionar canais ou linhas

Antes de se poder usar o objecto criado é necessário adicionar pelo menos um canal ou linha. Para adicionar canais ao objecto usa-se a função *addchannel*. Por exemplo, para adicionar dois canais a *ai*:

```
chans = addchannel(ai,1:2);
```

Configuração das propriedades

O controlo do comportamento da aplicação de aquisição de dados é efectuado configurando as propriedades. As regras associadas a esta configuração incluem:

- Os nomes das propriedades não são *case sensitive*;
- Podem-se abreviar os nomes das propriedades;

Tabela C.2: Adaptadores suportados pela *acquisition toolbox*.

Hardware (fabricante)	Adaptor (nome)
Advantech	advantech
Measurement Computing	mcc
National Instruments	nidaq
Parallel port	parallel
Microsoft Windows sound card	winsound

- *Set(ai)* devolve todas as propriedades definíveis por *ai*, enquanto *set(ai.Channel(index))* devolve todas as propriedades definíveis pelo canal especificado.
- *Get(ai)* devolve os valores das propriedades actuais para *ai*;

Sintaxe das propriedades

Podem-se configurar e devolver os valores das propriedades de três maneiras: funções *get* ou *set*, *dot notation*, indexação do nome.

Get e *set*:

```
out = get(ai,'SampleRate');
set(ai,'SampleRate',11025)
```

dot notation:

```
out = ai.SampleRate;
ai.SampleRate = 11025;
```

Indexação permite associar um nome descritivo com um canal ou linha. Por exemplo, para associar o nome *Chan1* com o primeiro canal contido por *ai*:

```
set(ai.Channel(1),'ChannelName','Chan1');
out = ai.Chan1.UnitsRange;
ai.Chan1.UnitsRange = [0 10];
```

Trigger

Para ler dados da engine ou do disco (*ai*), ou para enviar dados (*ao*), é necessário despoletar um *trigger*. Depois da ocorrência do *trigger*, a entrada (*ai*) ou o envio (*ao*) fica automaticamente *on*.

Parar um objecto

Um objecto pára quando os dados solicitados são adquiridos (*ai*) ou saída (*ao*), um erro de tempo pode ocorrer, ou pode-se emitir uma função de paragem.

```
stop(ai)
```

Adquirir ou enviar dados

Para adquirir (*ai*) ou enviar (*ao*) dados é necessário:

1. Iniciar o objecto.
2. Ler ou enviar dados.
3. Para o objecto.

Iniciar o objecto.

Para iniciar o objecto usa-se a função *start* assim como para parar usa-se a função *stop*.

```
start(ai)
stop(ai)
```

Controlo de dados

Pré-visualizar dados

Quando um objecto *ai* está a correr podem-se pré-visualizar os dados a adquirir com a função *peekdata*. Por exemplo, para pré-visualizar 1000 amostras:

```
out = peekdata(ai,1000);
```

peekdata devolve o control da execução imediatamente ao Matlab e não extrai dados.

Ler dados em qualquer momento após a aquisição de dados por um objeto *ai*, pode-se extraí-los da *engine* com a função *getdata*. Por exemplo, para extrair 1000 amostras:

```
out = getdata(ai,1000);
```

O controlo de execução retorna ao MATLAB apenas quando todas as amostras solicitadas são devolvidas.

Enviar Dados Para enviar dados é necessário primeiro colocá-los numa fila na *engine* com a função *putdata*. Por exemplo, uma fila de 1000 amostras para a saída analógica descreve-se da seguinte forma:

```
putdata(ao,[1:1000]')
```

Exemplo prático de aplicação da *acquisition toolbox*

Exemplo1:

Com as seguintes linhas de código adquirimos um segundo de som:

```
ai = analoginput('winsound');
addchannel(ai,1);
set(ai,'SampleRate',44100)
set(ai,'SamplesPerTrigger', 44100)
start(ai)
data = getdata(ai);
plot(data)
delete(ai)
clear ai
```


Exemplo2: Programa que envia uma sinusóide para a saída (num pc para as colunas), captando também um sinal (se não houver qualquer outro som será a sinusóide enviada), processa-se o sinal captado de forma a demonstrar que o sinal captado é o sinal enviado, obviamente com ruído inerente ao meio em que o teste foi realizado.

```
% Jorge Cubal
% Exemplo que demonstra algumas das funcionalidades da data acquisition toolbox

close all;clear all; clc
% gerar sinusoides a uma frequencia freq
freq=600; % frequencia
duracao=3; % duração em segundos
fa=44100; % fa frequencia de amostragem
t=linspace(0,2*pi*duracao,fa*duracao); % gerar vector t
x=sin(freq*t); % sinal sinusoidal de amplitude
% 1 e frequencia "freq"

x=x';
% Configurar canais
fs=44100;
NI=length(x); % capta o tamanho de x mais 100 amostras
% Configura o canal de entrada
ai= analoginput('winsound');
addchannel(ai, 1);
set(ai, 'SampleRate', fs);
set(ai, 'TriggerType', 'manual');
set(ai, 'SamplesPerTrigger', NI);
% duração do sinal gravado = chirp + cauda de reverberação
% Configura o canal de saída
ao= analogoutput('winsound');
addchannel(ao,1);
set(ao, 'SampleRate', fs);
set(ao, 'TriggerType', 'manual');

% Enviar sinal x e ler ao mesmo tempo
putdata(ao, x);% coloca os dados na saída
start(ai); % iniciar ai
start(ao); % iniciar ao
trigger(ao);
trigger(ai);
[y,ti] = getdata(ai); % guarda o sinal x
stop(ai); % parar ai e ao
stop(ao);

% Calcula a fft de y, usando a frequencia de amostragem fs.
[f,mag] = daqdocfft(y,fs,NI);
plot(f,mag) % gráfico com a fft do sinal captado
```

```

grid on
ylabel('Magnitude (dB)')
xlabel('Frequency (Hz)')
title('Frequency Response')

[ymax,maxindex]= max(mag);
maxindex/duracao % frequencia onde se verifica o máximo

```

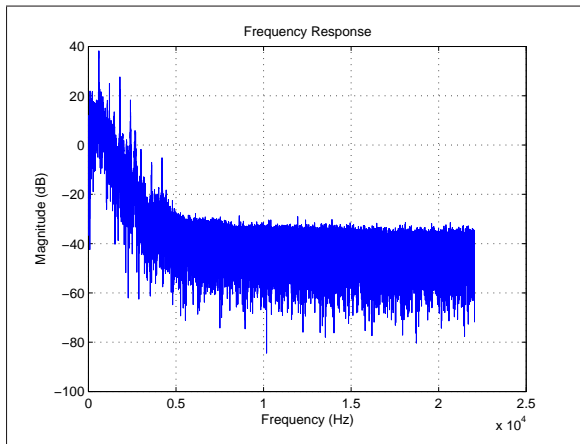


Figura C.2: Resultado do sinal captado no domínio da frequência.

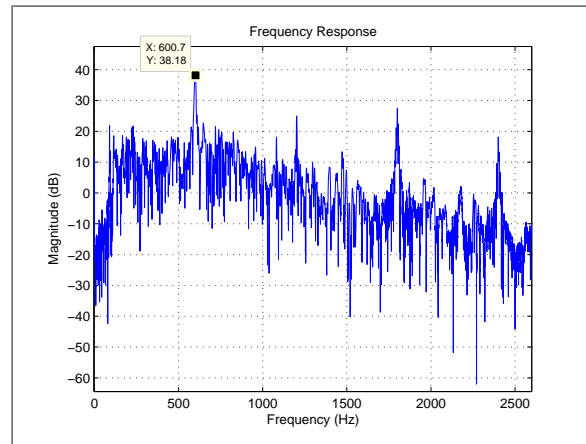


Figura C.3: Resultado do sinal captado no domínio da frequência, ampliado.

As Figuras C.2 e C.3 representam o sinal captado no domínio da frequência. Como podemos verificar no Matlab o máximo atinge-se a 601Hz, muito próximo dos 600Hz como seria esperado. É possível também encontrar os respectivos harmónicos do sinal enviado, a 1.2kHz, a 1.8kHz e a 2.4kHz sensivelmente. Com este pequeno exemplo demonstramos o funcionamento básico da *toolbox*.

Apêndice D

Microfones

Neste anexo apresentam-se os microfones usados e algumas montagens.



Figura D.1: Microfone Behringer ECM8000.



Figura D.2: Microfone Sennheiser 541.



Figura D.3: Microfone Shure Prologue 10L.



Figura D.4: Microfones Studio Project C4.



Figura D.5: Microfone Studio Project LSD2.



Figura D.6: Microfone AKG C426B.



Figura D.7: Caixa de selecção da direcção do microfone AKG C424B.

Apêndice E

Manual de Utilização do Sistema de Medição

Este documento é um pequeno tutorial da aplicação elaborada para medição de microfones: **Microphone Measurement**.

1. O primeiro passo é ter o Matlab instalado no PC, e a pasta *AplicacaoVersaoFinal* onde se encontram todos os ficheiros necessários. Abrir o *m-file* *MicroM2.m* e executar (pressionar F5).
2. O material básico necessário engloba um PC, uma placa de som, um amplificador, um altifalante, cabos para efectuar todas as ligações entre dispositivos e o microfone a medir.
3. Após todos os drivers instalados (placa de som e outros aparelhos que o necessitem) estamos em condições de iniciar a medição. É também necessário medir a distância entre os transdutores e entre estes e o solo, de forma a prever a primeira reflexão proveniente da sala.
4. Inserir os 5 campos necessários:
 - Nome - da gravação (**Name**);
 - **Path** - localização onde queremos guardar o ficheiro *log* e os resultados (".\"Para o directório corrente);
 - Apontamentos relevantes à medição (**Comments**);
 - Distância entre transdutores (**Distance between transducers**) e distância entre estes e o solo (**Distance to the ground**), valores em metros (m) e separados por ponto e não vírgula.
5. Clicar no botão **Run**, o chirp logarítmico é enviado para o aparelho de reprodução, altifalante, e captado pelo microfone. Aguardar até a apresentação no espaço reservado aos gráficos de uma figura correspondente à resposta a impulso de toda a cadeia de medida.
6. Para visualizar a resposta truncada no tempo pressionar o botão **Anechoic IR**. Para obter a resposta truncada mas com a figura no domínio da frequência clica-se em **Anechoic FR**.

A figura E.1 mostra os equipamentos necessários, e a forma como estes se ligam entre si, para a medição da resposta impulsional de microfones, segundo o método da correlação implementado. Importante não esquecer a ligação directa entre a saída e a entrada do canal direito da placa de som (canal que envia e recebe o sinal de sincronismo).

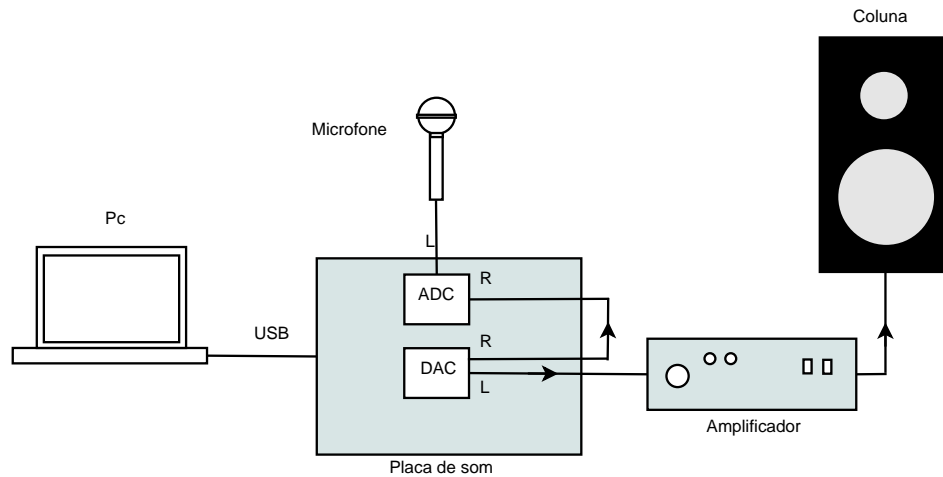


Figura E.1: Esquema da montagem para medição da resposta de microfones.

Procedimento para guardar uma resposta de referência

Para guardar uma resposta de referência deve-se efectuar a medição do microfone a usar como referência, segundo os passos já explicados. De seguida pressiona-se **Save reference**. Troca-se o microfone e efectua-se a medição do microfone a analisar. Por fim pressiona-se **Anechoic FR - Ref**; será apresentada a resposta em frequência compensada do microfone medido. Pressionando o botão **Delete reference** colocamos a referência com uma resposta plana, ou seja visualizando a resposta compensada obtemos os mesmos resultados que **Anechoic FR**.

A figura E.2 apresenta a interface criada. À esquerda temos os cinco campos a ser preenchidos e à direita a visualização de um resultado (no caso a resposta no tempo de um microfone e sua cadeia de medida).

Esta é uma forma fácil e rápida de medir microfones.

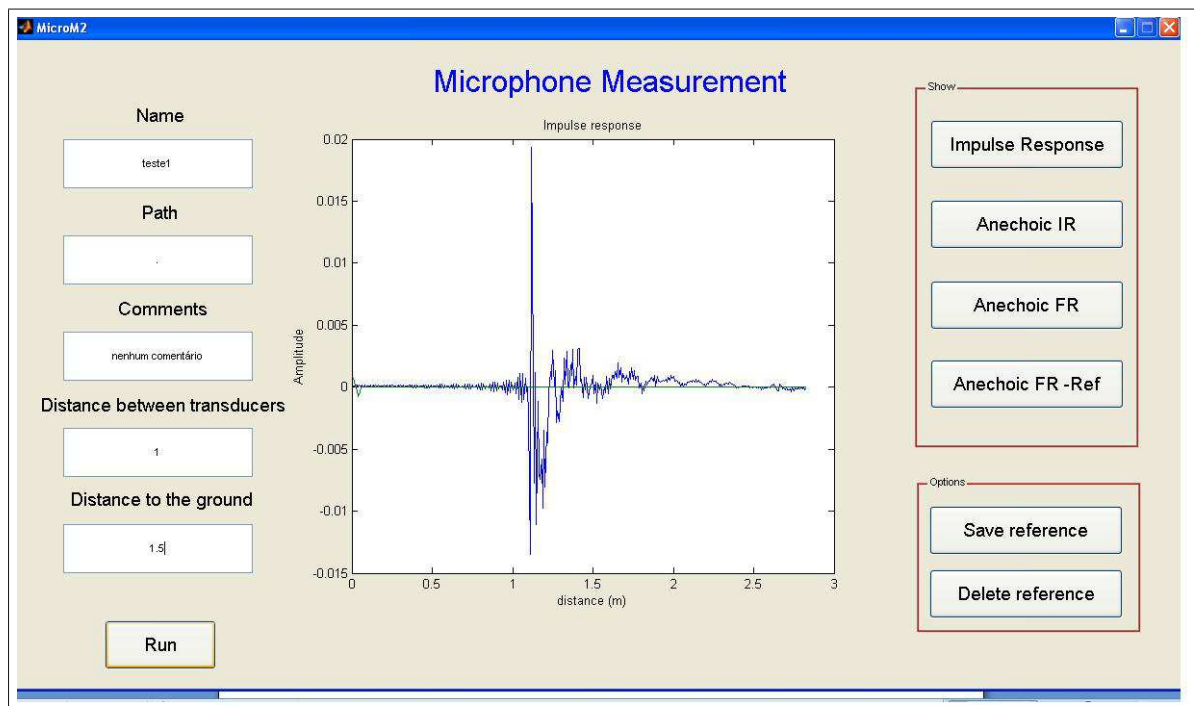


Figura E.2: Interface para medição de microfones.

Apêndice F

Lista de Acrónimos

APEA	<i>Associação Portuguesa de Engenharia de Áudio</i>
DETI	<i>Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática</i>
DTFT	<i>Discrete-time Fourier transform</i>
FET	<i>Field Effect Transistor</i>
FFT	<i>Fast Fourier transform</i>
IR	<i>Impulse Response</i>
LTI	<i>Linear Time Invariant</i>
M/S	<i>Middle Side</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MLS	<i>Maximum length sequences</i>
ORTF	<i>Office de Radiodiffusion Télévision Française</i>
PC	<i>Personal Pomputer</i>
TDS	<i>Time Delay Spectrometry</i>
WAV	<i>Waveform Audio Format</i>

Bibliografia

- [1] Som ao Vivo. Som ao vivo, 2010. [Online; accessed 27-Março-2010], <http://www.somaovivo.mus.br/artigos.php?id=75>.
- [2] Audio-technica. Ae3300 cardioid condenser microphone, 2010. [Online; accessed 27-Março-2010], http://eu.audio-technica.com/en/resources/9ce76d6e3ddcaa7e_ae3300_english.pdf.
- [3] Audio-Technica. O que um microfone faz, 2010. [Online; accessed 04-Março-2010], <http://www.audio-technica.com/cms/site/2053466a7579fbd9/index.html/>.
- [4] K. Blair Benson. *Audio Engineering Handbook*. Mc Graw Hill, New York, 1988.
- [5] Bruel and Kjaer. Measurement microphones. 1994.
- [6] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens and J. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, 1982.
- [7] National Semiconductor Corporation. Integrated circuits for high performance electret microphones. 2006.
- [8] Carlos Correia da Silva e Homero Sette Silva. Alto-falantes e caixas acústicas, características e utilização. 2004.
- [9] S. Phillips, Y. Dain, and R. Lueptow. *Theory for a gas composition sensor based on acoustic properties. Meas. Sci. Technol.*, pp. 70-75, 2003.
- [10] César Rodrigues , José Vieira e Guilherme Campos. Fortius: robot para captação de som. *AES*, 2008.
- [11] Angelo Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. *J.AES*, Paris , 2000.
- [12] Erling Frederiksen. Condenser microphones. *Bruel & Kjaer, Sound and Vibration Measurement*, 2004.
- [13] E. C. Ifeachor and B. W. Jervis. *Digital Signal Processing A Pratical Approach*. Addison-Wesley Publishing Company,, 1993.
- [14] L. Jackson. *Signals, Systems and Transforms*. Addison-Wesley Publishing Company,, 1991.
- [15] Colby Leider. *Digital Audio Worstation*. Mc Graw Hill, University of Miami, 2004.

- [16] MUSICAUDIO. Faixa de frequência de instrumentos musicais, 2010. [Online; accessed 20-Fevereiro-2010], http://www.musicaudio.net/dicas/tab_faixa_freq_instr_musicais.htm.
- [17] MUSICAUDIO. Introdução aos microfones, 2010. [Online; accessed 04-Março-2010], <http://www.musicaudio.net/gratis/microfones/index.htm>.
- [18] Alec Nisbett. *The use of microphones*. Focal Press, Oxford, 1993.
- [19] Portaudio. Portaudio - portable cross-platform audio api, 2010. [Online; accessed 10-Março-2010], <http://www.portaudio.com/>.
- [20] Studio Projects. C serie microphones. *Audio Group*, 2010.
- [21] Muller, S. and P.Massarani. *Transfer-Function Measurement with Sweeps*. Journal of the Audio Engineering Society, 2001.
- [22] Ron Tipton. Diy microphone calibration. *audioxpress*, 2009.
- [23] Alexandre Bêco Vieira. *Caracterização objectiva e subjectiva de campos sonoros*. 2008.
- [24] Daniel Albuquerque, José Vieira and Carlos Bastos. Room acoustics simulator for ultrasonic robot location. *Revista do Deti*, 2008.
- [25] G. N. Watson. *A Treatise On The Theory of Bessel Functions 2-edition*. Merchant Books, Cambridge, 1944.
- [26] Erhard Werner. Dynamic pressure microphones. *Handbook od Signal Processing in Acoustics*, 2004.

Outros anexos só estão disponíveis para consulta através do CD-ROM.
Queira por favor dirigir-se ao balcão de atendimento da Biblioteca.

Serviços de Biblioteca, Informação Documental e Museologia
Universidade de Aveiro